

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

АКУСТИКА СЛУХУ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 171 «Електроніка»,
освітньою програмою «Акустичні електронні системи та технології обробки
акустичної інформації»*

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №10 від 18.06.2020 р.)

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Акустика слуху: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка», освітньої програми «Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: К. С. Дрозденко, О. І. Дрозденко. – Електронні текстові дані (1 файл: 7,67 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 99 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №10 від 18.06.2020 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроніки (протокол № 05/2020 від 25.05.2020 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

АКУСТИКА СЛУХУ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Укладачі: *Дрозденко Катерина Сергіївна*, канд. техн. наук
Дрозденко Олександр Іванович, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний редактор: *Найда С. А.*, професор кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем, д-р техн. наук, проф.

Рецензент: *Іванько К.О.*, канд. техн. наук, доц., доцент кафедри електронної інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського

При підготовці бакалаврів за спеціальністю 171 «Електроніка», освітньою програмою «Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації» однією з важливих дисциплін циклу професійної підготовки, є дисципліна «Акустика слуху».

Посібник присвячено вивченню слуху і особливостей сприйняття звуків людиною. Розглянуті фізіологічні основи звукосприйняття, теорії слуху, об'єктивні та суб'єктивні характеристики звуку, їх зв'язок. Викладені особливості бінаурального прослуховування. Приділена увага моделям механічних та гідроакустичних структур вуха, а також сучасним методам діагностики слуху людини.

Метою розробки посібника є отримання студентами знань в галузі медичної акустики і їх подальшого застосування в процесі навчання, у практичній діяльності та наукових дослідженнях за фахом.

Конспект лекцій містить теоретичні відомості до 16 лекцій та список рекомендованої літератури.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Лекція 1. Будова і механізм роботи слухової системи людини.....	5
Лекція 2. Теорії слуху	10
Лекція 3. Акустичний рефлекс. Електричні потенціали завитки. Нелінійні властивості слуху	16
Лекція 4. Звукові коливання та їх характеристики	22
Лекція 5. Порогові величини. Область чутності	30
Лекція 6. Критичні смуги слуху. Гучність. Рівень гучності	37
Лекція 7. Гучність складних звуків. Часові характеристики слуху. Адаптація слуху.....	41
Лекція 8. Маскування звуку.....	48
Лекція 9. Висота і тембр звуку.....	54
Лекція 10. Бінауральний слух.....	59
Лекція 11. Бінауральне сумування гучності. Ефекти інтегральної локалізації та передування. Бінауральне маскування і демаскування.....	65
Лекція 12. Слухове сприйняття просторових систем.....	72
Лекція 13. Моделі механічних та гідроакустичних структур вуха людини-1....	78
Лекція 14. Моделі механічних та гідроакустичних структур вуха людини-2....	83
Лекція 15. Методи діагностики слуху людини.....	88
Лекція 16. Методи діагностики слуху людини-2.....	93
Список рекомендованої літератури	99

ВСТУП

Основні завдання кредитного модуля "Акустика слуху" – зрозуміти, яким чином слухова система формує звуковий образ, встановити основні відповідності між фізичними стимулами і слуховими відчуттями, і виявити, які саме параметри звукового сигналу є найбільш значущими для передачі інформації.

Закономірності взаємозв'язку між об'єктивними характеристиками звуку і відчуттями його сприйняття, як правило, встановлюються на основі суб'єктивних спостережень. Ці взаємозв'язки лише інколи описуються за допомогою емпіричних формул, частіше представляються у вигляді графіків, а інколи вони носять лише описовий характер.

Знання з дисципліни "Акустика слуху" можуть бути успішно використані в сфері розробки сучасної аудіотехніки (вдосконалення регуляторів рівня і тембру, акустичних систем, шумоглушників, еквайзерів і підсилювачів потужності, зниження шуму квантування при розробці цифрової аудіоапаратури з урахуванням слухового сприйняття), вдосконалення музичних інструментів, розвитку комп'ютерного музичного синтезу, для звукорежисерів, виконавців музичних творів. Ці ж знання будуть корисними при комплектуванні звукових студій і узгодженні між собою різної аудіоапаратури, при вирішенні завдання пониження швидкості цифрових звукових потоків без зниження суб'єктивної якості звучання у системах зв'язку і звукового мовлення, при вирішенні питань кодування звукових сигналів для їх використання в системах радіомовлення і для передачі високоякісного звуку в мережі Інтернет.

ЛЕКЦІЯ 1. БУДОВА І МЕХАНІЗМ РОБОТИ СЛУХОВОЇ СИСТЕМИ ЛЮДИНИ

Вухо складається з трьох частин: зовнішнього вуха, середнього і внутрішнього. Дві перші частини виконують передатну функцію і відповідають за підведення звукових коливань до слухового аналізатора, що знаходиться у внутрішньому вусі – завитці.

На рис. 1.1 зображена спрощена схема органу слуху людини. Звукові хвилі сприймаються акустичною рупорною антеною, функції якої виконує вушна раковина. Далі через зовнішній слуховий прохід, який виконує функції короткого хвилеводу, звук діє на барабанну перетинку. Ця перетинка увігнута всередину і натягнута. Ці три елементи (вушна раковина, зовнішній слуховий прохід і барабанна перетинка) утворюють *зовнішнє вухо*.

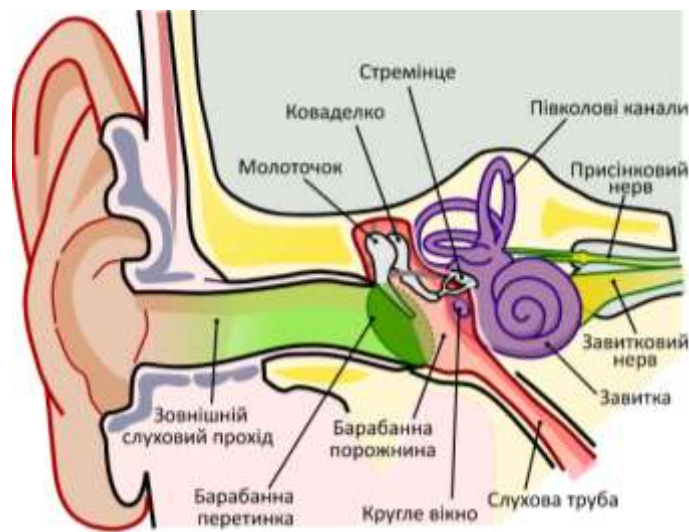


Рис. 1.1. Будова вуха людини

Середнє вухо (рис. 1.2) представлене барабанною порожниною, в якій розташовані три слухові кісточки: молоточок, коваделко і стремінце, які шарнірно сполучені між собою суглобами і оснащені м'язовою тканиною з двох м'язів – барабанного (напруження барабанної перетинки) і стремінцевого (адаптація до гучних звуків).

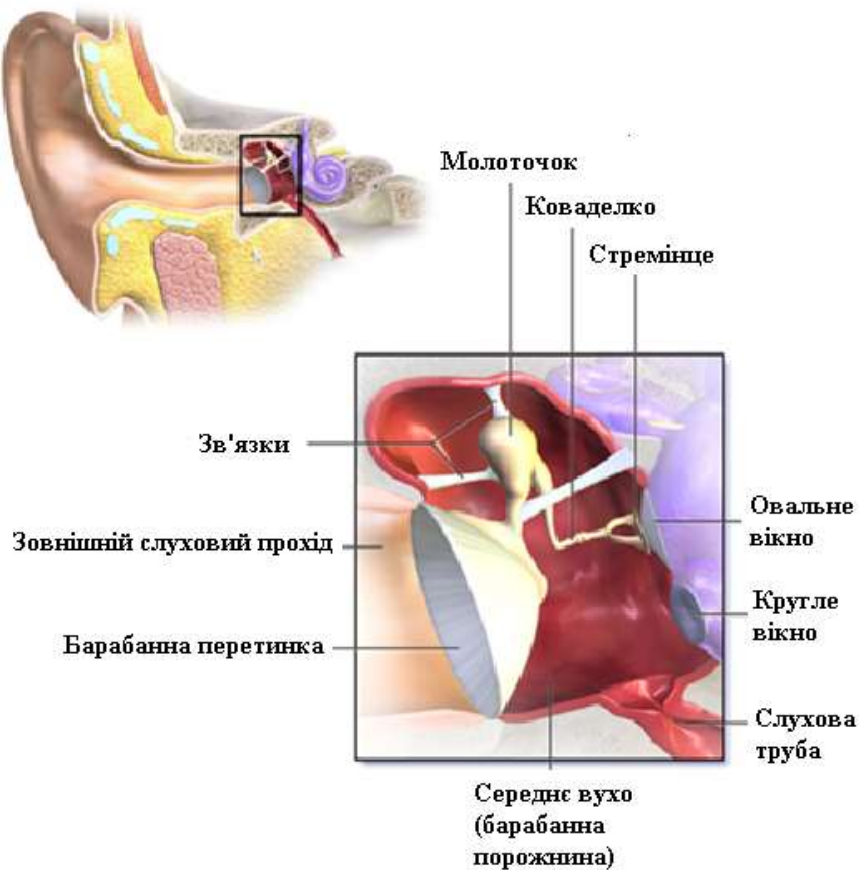


Рис. 1.2. Будова середнього вуха людини

Руків'я молоточка прикріплене до барабанної перетинки. Основа стремінця закриває собою овальне вікно, яке веде до вестибулярної частини внутрішнього вуха. Стреміньце в овальному вікні закріплене не жорстко і може здійснювати зворотньо-поступальні рухи. Слухові кісточки утворюють систему важелів для передачі звукових коливань від барабанної перетинки з більшою поверхнею до овального отвору з меншою поверхнею. Цей механізм забезпечує передачу звукової енергії з повітряного середовища у середовище, заповнене рідиною у внутрішньому вусі (перетворює повітряні коливання з великою амплітудою коливальної швидкості і невеликим тиском в механічні коливання стремінця з невеликою амплітудою коливальної швидкості і високим тиском). Євстахієва (слухова) труба сполучає барабанну порожнину з носоглоткою і служить для вирівнювання статичних тисків по обидві сторони барабанної перетинки. Т.ч., середнє вухо виконує наступні функції: узгодження імпедансу повітряного середовища з рідким середовищем завитки внутрішнього вуха;

захист від гучних звуків (акустичний рефлекс); підсилення звукового тиску (майже на 38 дБ) звукового коливання.

Внутрішнє вухо сформовано кістковим лабіринтом, що об'єднує в собі орган рівноваги і орган слуху – завитку (рис. 1.3).

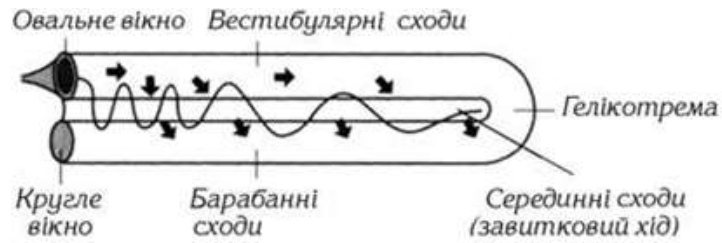


Рис. 1.3. Будова внутрішнього вуха людини

Завитка відіграє основну роль в слуховому сприйнятті. Вона є трубкою змінного перерізу, згорнутою в 2,5 оберти. У розгорнутому вигляді вона має довжину 3,5 см. У середині завитки має надзвичайно складну структуру. По усій довжині вона розділена двома мембранами на три порожнини (називаються сходи): вестибулярні сходи, серединні сходи і барабанні сходи (рис. 1.4). Зверху серединна порожнина закрита мембраною Рейсснера, знизу – базилярною мембраною. Усі порожнини заповнені рідиною.

Між вестибулярними сходами і барабанною порожниною знаходиться овальне вікно, а між барабанними сходами і барабанною порожниною середнього вуха – кругле вікно, закрите пружною мембраною. Серединні сходи заповнені ендолімфою, інші – перилімфою. Перилімфатичні порожнини сполучаються між собою через отвір поблизу вершини завитки, що називається гелікотремою. Ендолімфа і перилімфа мають різні значення в'язкості і щільності.

Основна (базилярна) мембрана є аморфною неналягнутою перетинкою, закріпленою по краях. Довжина її приблизно 32 мм, ширина поблизу овального вікна, тобто у стремінця, близько 0,1 мм і поблизу вершини близько 0,5 мм.



а



б

Рис. 1.4. Завитка в розгорнутому вигляді:

а) вертикальний переріз; б) поперечний переріз

Основна мембрана складається з декількох тисяч волокон, натягнутих поперек завитки. Волокна слабо пов'язані між собою і тому можуть коливатися незалежно. З боку ендолімфи на основній мембрані розташований кортієв орган (рис. 1.5). Він містить близько 22 тисяч волоскових клітин – слухових рецепторів, чутливих до тиску і деформацій основної мембрани. З волосковими клітинами контактують закінчення нервових волокон, які об'єднуються в пучок, що називається слуховим нервом.

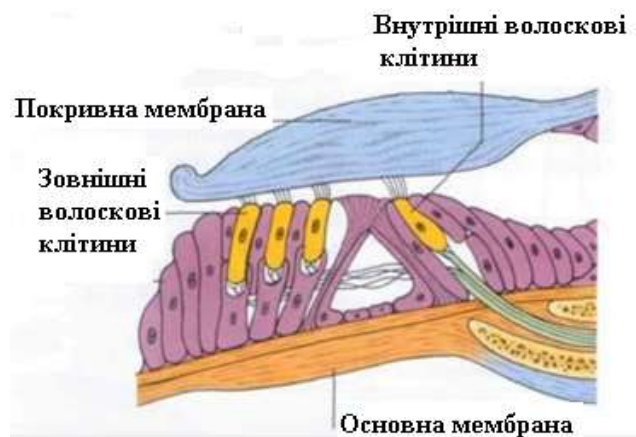


Рис. 1.5. Будова кортієвого органа

У поперечному напрямі кортієв орган складається з одного ряду внутрішніх волоскових клітин і трьох рядів зовнішніх волоскових клітин. Між ними утворюється тунель. Волокна слухового нерва перетинають тунель і контактують з волосковими клітинами. При звукових коливаннях стремінце приводить в рух мембрану овального вікна. Під дією цих коливань мембрана круглого вікна коливається в такт з мембраною овального, оскільки лімфа практично нестискувана. Лімфа коливається дотично до поверхні основної мембрани, упоперек її волокнам. На коливання лімфи реагують (резонують) залежно від частоти коливань тільки певні волокна. Біля гелікотреми розташовані найдовші волокна, резонансна частота яких лежить в області низьких частот. У основі завитки (між овальним і круглим вікнами) розташовані найкоротші волокна, які резонують на високих частотах. Складні звуки, що містять декілька частотних складових, збуджують декілька груп волокон. Таким чином, основна мембрана виконує роль частотного аналізатора.

Загальний механізм передачі звуку спрощено може бути представлений таким чином: звукові хвилі проходять звуковий канал і збуджують коливання барабанної перетинки. Ці коливання через систему кісточок середнього вуха передаються овальному вікну, яке штовхає рідину у верхньому відділі завитки, в ній виникає імпульс тиску, який примушує рідину переливатися з верхньої половини в нижню через барабанні сходи і гелікотрему і чинить тиск на перетинку круглого вікна, викликаючи при цьому його зміщення у бік, протилежний до руху стремінця. Рух рідини викликає коливання базилярної мембрани (біжуча хвиля). Перетворення механічних коливань мембрани в дискретні електричні імпульси нервових волокон відбуваються в органі Корті. Коли базилярна мембрана вібрує, війки на волоскових клітинах згинаються, і це генерує електричний потенціал, що викликає потік електричних нервових імпульсів, що несуть усю необхідну інформацію про звуковий сигнал, що поступив, в мозок для подальшої переробки і реагування.

ЛЕКЦІЯ 2. ТЕОРІЇ СЛУХУ

Не зважаючи на те, що в механічному плані конструкція завитки дуже проста, досі немає єдиної точки зору, яким чином передається акустичний сигнал від стремінця до слухового аналізатора. Теорії слуху базуються на тому, які хвилі виникають і чи виникають вони взагалі.

1. Просторова (резонансна) теорія Гельмгольца

Тривалий час для пояснення виникнення слуху користувалися резонансною теорією Г. Гельмгольца, запропонованою в 1863 році. Згідно з даною теорією у завитці утворюються стоячі хвилі. Базилярна мембрана представляється як набір поперечних волокон, слабо пов'язаних між собою. Кожне волокно поводить себе як струна. Оскільки кожне волокно має різну довжину, воно має власну частоту, відмінну від частот інших волокон. При високочастотних звуках коливаються короткі волокна основної мембрани в основі завитки, при низьких – довгі у вершині завитки. При складному акустичному впливі кожне волокно резонує на своїй власній частоті, при цьому збуджуються відповідні нервові клітини, від яких сигнал надходить до кори головного мозку.

Нині ця теорія покращена. Згідно з сучасною теорією, у завитці коливається стовп рідини певної довжини. Чим вищий звук, тобто чим більша частота коливань звукових хвиль, тим менша довжина коливного стовпа рідини в каналах завитки і тим ближче до основи завитки та овального віконця знаходиться місце максимальної амплітуди коливань. При дії звуків низької частоти довжина коливного стовпа рідини збільшується і місце максимальної амплітуди коливань переміщується в бік вершини завитки. Під час коливання рідини в каналах завитки коливаються не окремі волокнинки основної мембрани, а її ділянки певних розмірів. Внаслідок цього збуджується різна кількість рецепторних волоскових клітин кортієвого органа, розміщеного на основній мембрані. Чим нижчий звук, тим більше рецепторних клітин збуджуватиметься. Отже, кожній висоті звуку відповідає певна довжина

ділянки основної мембрани, залученої до коливання, і певна кількість збуджених рецепторних клітин.

Переваги теорії Гельмгольца:

- дозволила пояснити основні властивості вуха: визначення висоти, сили і тембру.

Недоліки теорії:

- для того, щоб волокна поводити себе як струни, вони повинні бути натягнуті, а ніяких даних про натяг волокон по довжині не існує;
- інформація про звукову хвилю надходить в мозок практично миттєво. Таке можливе, коли коливальна система практично безінерційна. Як відомо, без інерційні системи характеризуються значним затуханням, тобто передача звуку супроводжувалася б постійним гулом у вухах.

2. Телефонна теорія Резерфорда

Згідно з "телефонними" теоріями, периферичний механізм слуху не аналізує частоти, а лише передає сигнал в центральну нервову систему для обробки.

Ця теорія свідчить, що завитка не є частотно-чутливою по усій своїй довжині, а усі її ділянки реагують на усі частоти відразу. Робота волоскових клітин полягає в простій передачі усіх параметрів хвилеподібного подразника до слухового нерва, а аналіз частоти і інтенсивності здійснюється на більш високих рівнях.

Оскільки нейрон може відповідати тільки за принципом "все або нічого", єдиний шлях, по якому він може передавати частотну інформацію, – це включатися таку кількість разів в 1 с, яка відповідає частоті повідомлення, що передається (наприклад, він повинен включитися 720 разів за 1 с, щоб передати сигнал частотою 720 Гц). Частотна теорія, таким чином, припускає, що слухові нервові волокна можуть збуджуватися досить швидко, щоб передати цю інформацію.

Теорія Резерфорда може бути використана для пояснення сприйняття звуків низьких частот (до 1000 Гц), проте верхня межа числа розрядів в 1 с обмежена абсолютним рефракторним періодом нейрона. Абсолютний рефракторний період – це час відпочинку, потрібний клітині для відновлення поляризації після розряду (збудження) і необхідний для подальших спалахів; він складає близько 1 мс. Впродовж абсолютного рефракторного періоду волокна не можуть включатися незалежно від інтенсивності подразника.

Цей період змінюється відносним рефракторним періодом, під час якого нейрон відновився, але ще не на повну силу і зможе відреагувати, якщо надійде досить сильний подразник. Максимальній частоті відповідає приблизно 1 мс абсолютного рефракторного періоду.

Друга проблема "телефонної теорії" полягає в тому, що ушкодження верхівкової частини завитки призводить до втрати здатності сприймати звуки високої частоти. Це суперечить частотній теорії, яка свідчить, що різні ділянки завитки не є диференційовано чутливими до частоти.

Загалом, теорія представляє на сьогодні тільки історичний інтерес.

3. Теорія залпів Вевера (теорія часового кодування)

Найбільш важливою модифікацією частотної теорії був принцип залпів, запропонований Вевером. Замість припущення про те, що будь-який нейрон повинен нести усю інформацію, принцип залпів свідчить, що передача звукового сигналу високої частоти забезпечується групою слухових волокон (рис. 2.1).

Синусоїда (звукова хвиля) у верхній частині малюнка має занадто високу частоту, щоб бути переданою серією спайкових розрядів по одиничному волокну слухового нерва. Лабільність волокон слухового нерва становить 1000/с, тому волокна реагують групами і в сумарній відповіді групи знаходиться спайк, що відповідає кожному циклу стимулу. Відповідь кожного нейрона розділена певним інтервалом. На малюнку інтервал кожного нейрона складає 5 циклів, тому волокно "2" реагує на цикли 1 і 6; волокно "3" – на 2 і 7, і

так решта волокон. Таким чином, завдяки збудженню багатьох волокон можуть сприйматися звуки високих частот.

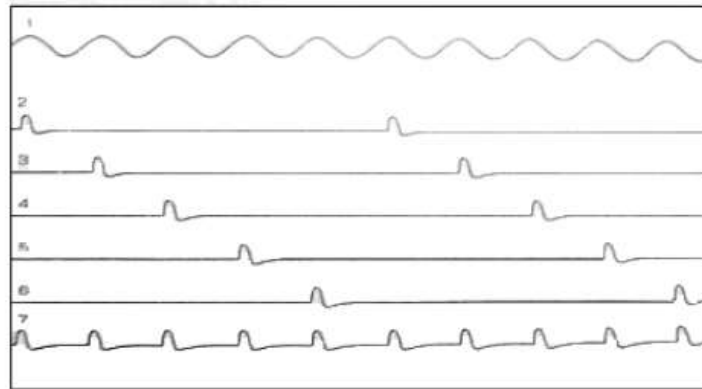


Рис. 2.1. Схема передачі сигналу:

1 – звукова хвиля, 2 – волокно «а», 3 – волокно «б», 4 – волокно «в», 5 – волокно «г», 6 – волокно «д», 7 – результуючий сигнал

Розряди волокон слухового нерва насправді йдуть за періодичністю стимулу аж до частоти близько 4-5 кГц.

4. Просторово-частотна теорія

Згідно з цією теорією низькочастотні сигнали передаються як у просторовій теорії (бацилярну мембрану розглядають як набір струн), а високочастотні – по залповій теорії.

5. Теорія стоячих хвиль Евальда

Суть цієї теорії в тому, що під час руху всередину завитки і назовні стремінце при надходженні акустичного сигналу в залежності від його складності створює так звані "звукові блоки" (патерни) в перилімфі завитки у вигляді "стовпчиків перилімфи" між базальною мембраною і стремінцем. В залежності від конфігурації акустичного сигналу ці "стовпчики" мають різну форму і, відповідно, створюватимуть різного роду "візерунки" коливання усієї базальної мембрани у вигляді стоячих хвиль. Згідно з цією теорією уся

інформація про частоту і інтенсивність акустичного коливання, як і в телефонній теорії, відноситься до сфери дії вищих структур слухової системи, що не підтвердилося надалі. У зв'язку з цим теорія Евальда не отримала суттєвого значення і на сьогодні являє тільки історичний інтерес.

6. Теорія біжучої хвилі (теорія просторового кодування Бекеші)

Дану теорію ще називають гідродинамічною, теорією біжучої хвилі, місця. Теорією місця її називають тому, що сприйняття звуку певної частоти пов'язують з певною ділянкою базальної мембрани. Гідродинамічну назву вона отримала у зв'язку з тим, що збудження рецепторних клітин пов'язане з рухом рідини. Нарешті, теорією біжучої хвилі її називають у зв'язку з формуванням хвиль рідини, які поширюються вздовж ендокохлеарного каналу на різні відстані залежно від частоти звукових коливань. Суть теорії полягає в тому, що зміщення ендолімфи викликає формування хвилі, яка розповсюджується вздовж ендолімфатичного каналу. Оскільки стремінце весь час коливається, то постійно виникають біжучі хвилі. Кожна хвиля спочатку слабка, а згодом досягає максимуму і зникає. Максимум біжучої хвилі для різних частот знаходиться в різних ділянках базальної мембрани завитки (рис. 2.2).

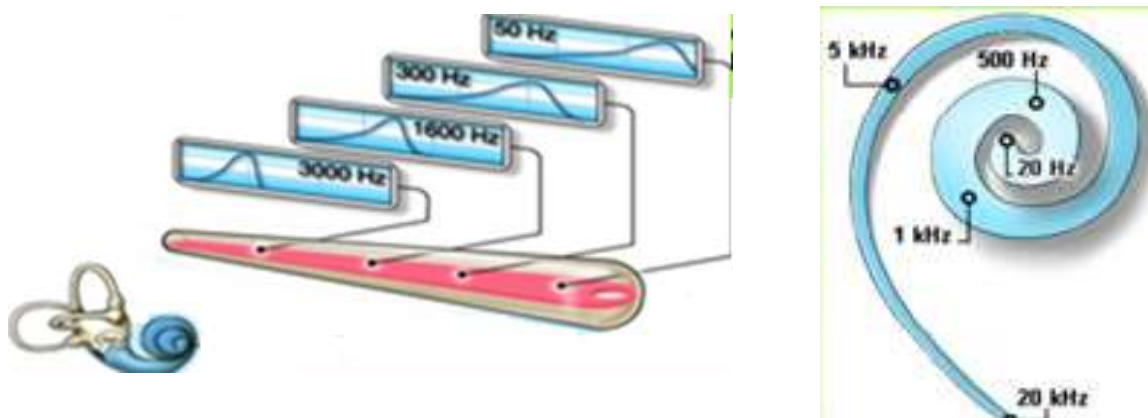
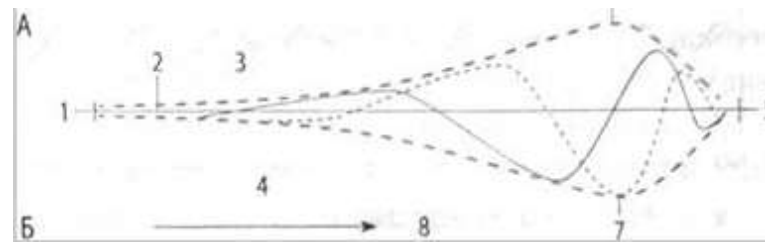


Рис. 2.2. Розташування біжучої хвилі при дії звуків різної частоти

Для хвиль, викликаних звуками високих частот, – поблизу основи завитки, для середніх частот – у середній частині й для низьких частот – на

верхівці завитки. Таким чином, при дії звуків високої частоти біжуча хвиля коротка, при дії середніх частот – довга, і найдовша хвиля буде при дії звуків низьких частот – вона поширюється протягом всього ендокохлеарного каналу (рис.2.3). Причина цього – жорсткість базальної мембрани. Вона найбільша біля основи завитки і поступово знижується в напрямку до гелікотреми. Відому роль відіграють і пружні сили каналу, заповненого рідиною.



а



б

Рис.2.3. Розповсюдження біжучої хвилі:

- а – обвідна показує максимальну амплітуду хвилі, викликану дією постійної частоти, у різних ділянках завитки;
- б – тривимірна реконструкція хвилі (1 – стремінце, 2 – базальна мембрана, 3 – вестибулярні сходи, 4 – барабанні сходи, 5 – гелікотрема, 6 – максимальна амплітуда хвилі, 7 – огинаяча хвиля, 8 – напрямок біжучої хвилі)

В останні роки вважають, що у відповідь на звукове подразнення реагує не вся система внутрішнього вуха, а відбувається поздовжнє скорочення окремих чутливих клітин. Механізм цього процесу – біохімічні процеси (активація білка міозину).

ЛЕКЦІЯ 3. АКУСТИЧНИЙ РЕФЛЕКС. ЕЛЕКТРИЧНІ ПОТЕНЦІАЛИ ЗАВИТКИ. НЕЛІНІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ СЛУХУ

Акустичний рефлекс – це рефлекторне скорочення стремінцевого м'яза при звуковому подразненні. Основна функція рефлексу – захисна. Дозволяє захистити рецептори завитки від пошкоджуючої дії гучних звуків, особливо низькочастотних. Скорочення стремінцевого м'яза відбувається одразу в обох вухах (двосторонній ефект), незважаючи на те, на яке вухо подається гучний звуковий подразник. Акустичний рефлекс виникає також якщо подути людині в око, або якщо людина співає.

Однак захисна функція акустичного рефлексу має певні обмеження: він не захищає від раптових інтенсивних шумів та довготривалих впливів. Це обумовлено особливостями протікання м'язових скорочень: час очікування скорочення становить порядку 10 мс, а максимальне скорочення настає мінімум через 100 мс. Через декілька секунд після початку впливу сила скорочення м'язу досягає 50% свого максимального значення.

Поріг акустичного рефлекса (ПАР) – це рівень звукового тиску акустичного подразника заданої частоти, при якому виникає акустичний рефлекс. ПАР – функція рівня звукового тиску і частоти. У людей з нормальним слухом ПАР становить 70-100 дБ. Зазвичай це значення на 10-20 дБ нижче больового порогу.

У випадку відсутності акустичного рефлексу середнє вухо не проводить акустичні коливання і передача звуку можлива лише за рахунок кісткової провідності. В даному випадку рівень сигналу, що доходить до завитки на 50-60 дБ нижче.

Електричні потенціали завитки

У завитці можна зареєструвати п'ять видів електричних потенціалів. Розрізняють сталі потенціали (спокою) і потенціали, що виникають при звуковому подразненні.

1) **Мембранний потенціал слухової рецепторної клітини** – це потенціал спокою (реєструється у відсутність звукових подразників). Відображає наявність різниці потенціалів між зовнішньою і внутрішньою поверхнею мембрани слухової рецепторної клітини. Реєструється при введенні у волоскову клітину мікроелектрода і дорівнює -80 мВ.

2) **Потенціал ендолімфи** (у серединних сходах) – реєструється у відсутність звукових подразників; обумовлений рівнем окислювально-відновних процесів в каналах завитки і дорівнює $+80$ мВ. Ендолімфа, що містить багато іонів калію, має позитивний заряд по відношенню до перилімфи вестибулярних і базилярних сходів. Він є джерелом енергії для процесу перетворення звукового подразнення в нервовий імпульс. Оскільки волоскові клітини омиваються позитивно зарядженою ендолімфою, то між внутрішньою і зовнішньою поверхнями різниця потенціалів становить 160 мВ.

Наступні три потенціали пов'язані з дією звуку на слуховий аналізатор.

3) **Мікрофонний потенціал завитки** – це змінний потенціал, який генерується на мембрані волоскової клітини кортієвого органу в результаті деформації волосків при зіткненні з покривною мембраною. Був відкритий Вевером та Бреєм у 1930 р. Частота мікрофонних потенціалів відповідає частоті звукових коливань, а амплітуда мікрофонних потенціалів відповідає силі звуку, тобто повністю відображає форму звукових хвиль. Цей потенціал аналогічний вихідній напрузі мікрофону, і якщо його подати на підсилювач і пропустити через гучномовець, то отримаємо відтворення мови. Походження мікрофонного ефекту пов'язують з механіко-хімічними перетвореннями у волоскових клітинах кортієвого органу, ушкодження якого призводить до зникнення мікрофонного ефекту. Реєструється вздовж слухового нерва і далі на всіх ділянках перемикавання нервових волокон аж до кори головного мозку.

4) **Сумаційний потенціал** виникає в результаті накладання мікрофонного потенціалу на потенціал ендолімфи. На відміну від мікрофонного, відтворює не форму звукової хвилі, а її обвідну. Можна сказати, що це сталий електричний

потенціал, що виникає у відповідь на звукове подразнення. Розрізняють усереднений та різницевий сумаційний потенціал.

5) **Потенціал дії** слухового нерва виникає через передачу збудження від волоскової клітини на волокна слухового нерва. При цьому частота генерованих потенціалів дії дорівнює частоті звукових хвиль, якщо вона не перевищує 1000 Гц. При збільшенні частоти звукових хвиль вище 1000 Гц збільшення потенціалу дії нервових волокон слухового нерва не відбувається, оскільки для слухового нерва лабільність дорівнює 1000 потенціалів дії за сек. Тому при дії на вухо більш високих тонів частота потенціалу дії в слуховому нерві багато нижче частоти звукових хвиль.

Нелінійні властивості слуху

В механізмі слухового сприйняття звуку закладена нелінійна процедура обробки. Експериментально доведено, що апарат зовнішнього і середнього вуха людини передає звукові коливання лінійно. Головна причина нелінійності слуху – в механізмі роботи внутрішнього вуха (завитки). Причини виникнення нелінійних спотворень – це гідродинамічні процеси в рідині завитки та електромеханічні перетворення у волоскових клітинах.

Нелінійність слуху проявляється як при великих, так і при малих рівнях звукового сигналу і грає істотну роль в слуховому сприйнятті музичних, мовних і шумових сигналів.

Завитка складається з трьох порожнин, в яких знаходиться рідина (рис. 1.4). При ударі стремінця по мембрані овального вікна в рідині виникає звуковий імпульс, який поширюється з верхнього відділу в нижній і збуджує базилярну мембрану. Дослідження роботи слухової системи показали, що при високих рівнях сигналу в рідині завитки утворюються вихрові потоки (рис. 3.1).

Поява цих завихрень спотворює форму звукового імпульсу, а оскільки базилярна мембрана виконує його спектральний аналіз, то ці спотворення і призводять до появи додаткових гармонік і комбінаційних тонів.

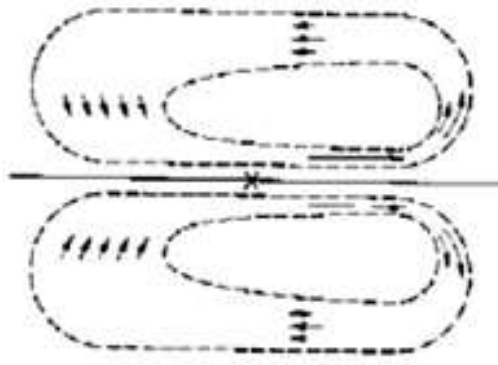


Рис. 3.1. Вихрові потоки в завитці

Щоб розглянути другу причину нелінійності, необхідно ще раз повернутися до механізму перетворення сигналу на базилярній мембрані – механічні зміщення мембрани передаються органу Корті, що складається з волоскових клітин, розташованих рядами уздовж базилярної мембрани, частина цих клітин називається внутрішніми (ВВК), їх близько 4000, інша частина – зовнішніми (ЗВК), їх близько 12000 (рис. 1.5)). Волоскові клітини – це механо-електричний перетворювач, який конвертує механічні зміщення мембрани в електричний потенціал, що викликає потік електричних імпульсів в пов'язаних з ними нервових волокнах, тобто вони працюють аналогічно аналого-цифровому перетворювачу.

Останні дослідження показали, що ВВК пов'язані в основному з висхідними нервовими волокнами, тобто вони, в основному, повідомляють звукову інформацію у вищі відділи мозку – це "слухові мікрофони", а ЗВК – з низхідними нервовими волокнами, тобто вони в основному отримують накази від мозку. Саме зовнішні волоскові клітини і відіграють основну роль в нелінійній компресії звуку. При великих рівнях сигналу вони подовжуються (на 10% від основної довжини) і, тим самим, притримують зміщення базилярної мембрани, оберігаючи внутрішні волоскові клітини від занадто великого вигину, а на малих рівнях сигналу вони посилюють зміщення, як би "підкачуючи" енергію базилярній мембрані.

Нелінійність слуху проявляється, передусім, в появі "суб'єктивних" або "слухових" гармонік. При дії на барабанну перетинку досить гучного

синусоїдального звуку з частотою f_0 в процесі його обробки в слуховому апараті виникають гармоніки цього звуку з кратними частотами $2f_0$, $3f_0$ і т.д. Наприклад, якщо подати первинний тон з частотою 500 Гц, то можна почути звуки з частотами 1000 Гц, 1500 Гц і т. д. Оскільки при об'єктивних вимірюваннях сигналу, що подається, можна точно встановити, що в спектрі первинного впливаючого тону цих гармонік немає, вони і дістали назву "суб'єктивних".

Наявність суб'єктивних гармонік і їх кількісна оцінка може бути виконана за допомогою прослуховування биття. Це явище виникає, якщо на систему подати два близькі по частоті тони, наприклад 1000 Гц і 1010 Гц; тоді замість двох тонів буде виразно чутний один тон з середньою частотою 1005 Гц, модульований по амплітуді різницевою частотою 10 Гц. Якщо різницю між двома тонами збільшувати, то при різниці частот вище 15 Гц биття зникають.

Другою формою прояву нелінійності слуху є поява "суб'єктивних комбінаційних тонів" для коливань зі складним спектром. Як відомо, якщо до нелінійної системи підвести два сигнали досить великого рівня з частотами f_1 і f_2 (наприклад, 800 Гц і 1000 Гц), то нелінійні спотворення викличуть появу комбінаційних тонів з різними частотами, тобто з'являються вторинні комбінаційні тони: $f_2 - f_1$ і $f_2 + f_1$ (200 Гц і 1800 Гц), кубічні комбінаційні тони $2f_1 - f_2$ (600 Гц), $2f_2 - f_1$ (1200 Гц), $2f_1 + f_2$ (2600 Гц), $2f_2 + f_1$ (2800 Гц) та ін. Численні експерименти показали, що існують особливі комбінаційні тони, які найчастіше прослуховуються при суб'єктивних експертизах: це різницеві тони з частотами $f_2 - f_1$ і $2f_1 - f_2$.

Нарешті, *третій вид прояву нелінійності роботи слухового апарату –* це нелінійна компресія звукового сигналу. Рівень звукового сигналу в чутному діапазоні змінюється від 0 дБ до 120 дБ, тобто амплітуда звукового тиску змінюється в 100 000 разів, в той же час динамічний діапазон слухового нерва (від температурного шуму до насичення) складає 1000. Тому, окрім функцій спектрального аналізатора, периферичний слуховий апарат виконує функції нелінійного компресора-підсилювача.

Висхідні слухові шляхи

Висхідні слухові шляхи починаються зі слухового нерва і закінчуються в корі головного мозку. Слуховий нерв є перекрученим стволом, серцевина якого складається з волокон, що відходять від верхівки завитки, а зовнішні шари – від нижніх її ділянок. Увійшовши до ствола мозку, нейрони взаємодіють з клітинами різних рівнів, піднімаючись до кори і перехреснюючись по дорозі так, що слухова інформація від лівого вуха поступає в основному в праву півкулю, де відбувається головним чином обробка емоційної інформації, а від правого вуха в ліву півкулю, де в основному обробляється смислова інформація. У корі основні зони слуху знаходяться в скроневій області, між обома півкулями є постійна взаємодія.

Слухові провідні шляхи і нижчі слухові центри – це провідникова частина слухової сенсорної системи, що проводить, розподіляє і перетворює сенсорне збудження, породжене слуховими рецепторами, для формування рефлекторних реакцій і слухових образів у вищих слухових центрах кори.

Схематичний шлях слухового збудження: слухові рецептори (волоскові клітини в кортієвому органі завитки) – периферичний спіральний ганглії (у завитці) – довгастий мозок – середній мозок – проміжний мозок – кора великих півкуль головного мозку.

ЛЕКЦІЯ 4. ЗВУКОВІ КОЛИВАННЯ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Ми чуємо звук, який передається через повітря і сприймаємо його як щось первинне. Дія звукової хвилі на слухову систему називається *подразненням*. В свою чергу подразнення створює у людини суб'єктивний ефект – *відчуття*. І подразнення, і відчуття істотно залежать від характеру звуку, тому для вивчення їх взаємозв'язку усі звуки доцільно розділити на групи залежно від того, як вони сприймаються на слух.

Чисті тони. В цьому випадку звуковий тиск описується синусоїдною функцією часу з постійною амплітудою, частотою і фазою. Тони на слух сприймаються як тихі або гучні, високі або низькі.

Співзвуччя. Це стаціонарний звук, що складається з декількох тонів, наприклад, звук дзвону. У більшості випадків під співзвуччям розуміють комбінацію основного тону і декількох обертонів. Співзвуччя має несинусоїдну форму, його звуковий тиск є періодичною функцією часу, спектр лінійний з приблизно однаковими складовими – основне коливання не домінує. До співзвучч також відносяться голосні звуки мови. На рис. 4.1 наведений графік спектру співзвуччя. По осі абсцис графіку відкладена поточна частота F , а по осі ординат - рівень звукового тиску спектральних складових.

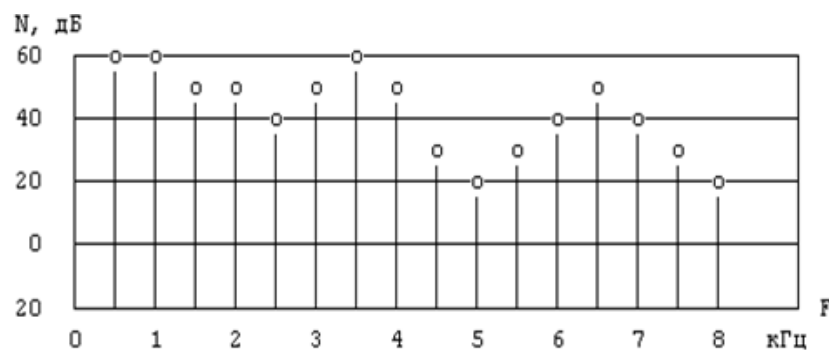


Рис. 4.1. Спектр співзвуччя

Амплітудно-модульовані звукові коливання. Більшість звуків, які ми чуємо, є нестационарними, амплітуда коливань у них є функцією часу. Спектр амплітудно-модульованого коливання має середню частоту і дві бічні складові (рис. 4.2).

Приклад – свисток спортивних суддів. У цього звуку середня частота 1,2 кГц, модулююча частота 5,25 Гц. Модуляція періодична, але несинусоїдна, спектр бічних складових не дуже широкий.

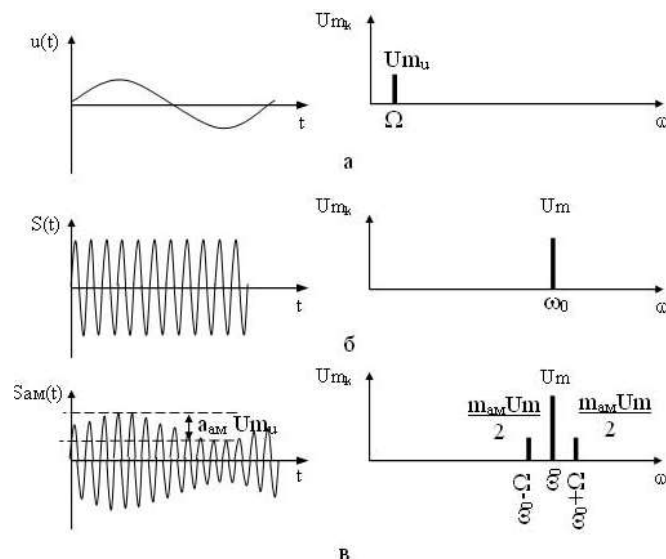


Рис. 4.2. Часові та спектральні діаграми:

а) модулюючого коливання; б) несуче коливання; в) амплітудно-модульованого коливання

Частотно-модульовані (ЧМ) звукові коливання. Такі коливання характеризуються середньою частотою, частотою модуляції і девіацією середньої частоти. Важливою характеристикою ЧМ-коливання є індекс модуляції, рівний відношенню девіації до модулюючої частоти. При малих індексах модуляції спектр ЧМ-коливання такий же, як у АМ-коливання. Чим більше цей індекс, тим більше числа бічних складових спектру і ширше спектр. Частотний інтервал між складовими спектру ЧМ-коливання дорівнює модулюючій частоті. На рис. 4.3 наведений приклад формування ЧМ-коливання.

У музичних звуках частотна модуляція проявляється у вигляді вібрато - періодичних змін висоти, гучності або тембру музичного звуку. У струнних інструментах викликається коливаннями пальця, в духових інструментах й у вокалістів – пульсацією повітряного тиску.

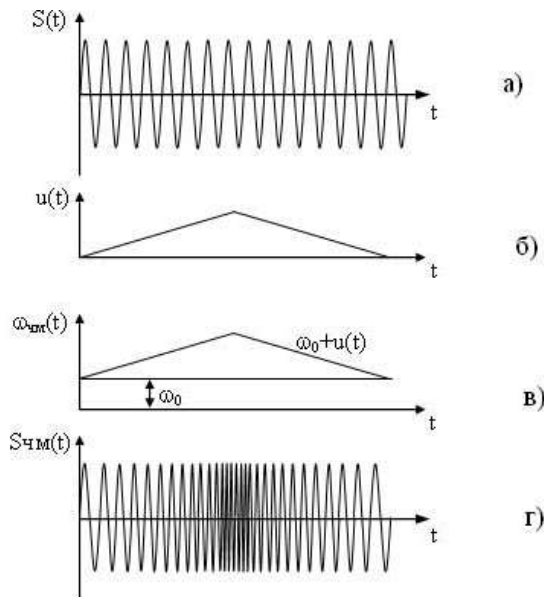


Рис. 4.3. Формування частотно-модульованого сигналу:

а) несуче коливання; б) модулююче коливання; в) графік зміни частоти частотно-модульованого коливання; г) частотно-модульоване коливання

Биття. Два тони з однаковими амплітудами і частотами, але з фазою, що змінюється, сприймаються на слух як періодична зміна гучності тону, що називається биттям. Такий звук має орган.

Шуми. Звуки, спектр яких безперервний, називаються шумами. Залежно від характеру огинаючої спектральної щільності потужності шуми мають умовні назви: білий, рожевий і рівномірно маскуючий. Залежно від ширини спектру шум може бути широкосмуговим, вузькосмуговим, октавним, третьоктавними та ін. Найважливішою характеристикою шуму є частотна залежність спектральної щільності потужності.

Білий шум. У цього шуму рівень спектральної щільності не залежить від частоти. У лінійній шкалі частот його графік має вигляд прямої лінії, паралельної осі частот. У октавній шкалі частот графік рівня спектральної щільності потужності цього шуму має вигляд похилої прямої лінії з підйомом в область високих частот з крутизною 3 дБ/октаву.

Рожевий шум. У цього шуму рівень спектральної щільності потужності в октавній шкалі не залежить від частоти і його графік має вигляд прямої лінії, паралельної осі частот. У лінійній шкалі частот графік рівня спектральної

щільності потужності цього шуму має вигляд прямої лінії, що спадає до високих частот з крутизною 3 дБ/октаву.

Рівномірно маскуючий шум. До частоти 500 Гц цей шум має характеристики білого шуму, а вище він має характеристики рожевого шуму. Це пов'язано з критичними смугами слуху, які до 500 Гц приблизно однакові по ширині, а понад 500 Гц їх смуга лінійно росте з частотою. Цей шум однаково маскує в усьому звуковому діапазоні частот. Він формується з білого шуму за допомогою фільтру, який на частотах вище 500 Гц створює спад з крутизною 3 дБ/октаву.

Вузькосмуговий шум супроводжує звуки майже усіх вокальних інструментів. Граючи на флейті, музикант збуджує не лише періодичний тон, але і вузькосмуговий шум від вдування повітря. Це надає виразність звучанню. Такі шуми виникають при грі на смичкових інструментах, а також в мові і співі.

Імпульси і послідовності звукових імпульсів. Короткі звуки створюють імпульси звукового тиску. Мова людини є послідовністю імпульсів звукового тиску різної амплітуди, частоти і тривалості. Довгі голосні звуки можна порівняти із стаціонарними тонами, короткі – краще називати звуковими імпульсами. При тривалості імпульсів 50 мкс усі спектральні складові лежать нижче 20 кГц. При зменшенні тривалості до 20 мкс велика частина спектру знаходиться за межами 20 кГц.

Об'єктивні характеристики звуку – це параметри звукової хвилі, які задаються джерелом звуку і можуть бути виміряні за допомогою приладів.

Суб'єктивні характеристики (гучність, висота, тембр) – це характеристики особистого сприйняття людиною звукового сигналу, які не можна виміряти. Про них можна лише скласти уявлення, на підставі словесного опису. Зв'язок між об'єктивними і суб'єктивними характеристиками звуку наведений в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

	Звуковий тиск	Частота	Спектр	Тривалість сигналу
Гучність	+++	++	+	+
Висота звуку	+	+++	++	+
Тембр	+	++	+++	+
Тривалість сприйняття	+	+	+	+++

+++ – величини дуже корельовані (пов'язані);

++ – середній зв'язок;

+ – слабкий зв'язок.

Об'єктивні характеристики звуку

Інтенсивність звуку I – середня кількість звукової енергії, що проходить в одиницю часу через одиницю поверхні. Інтенсивність пов'язана із звуковим тиском рівністю

$$I = \frac{P_{\max}^2}{\rho_0 c_0},$$

де P_{\max}^2 – квадрат порогового значення звукового тиску; $\rho_0 c_0$ – питомий акустичний опір повітря.

Одиницею вимірювання інтенсивності є Вт/м².

Рівні інтенсивності і децибели. Всі органи відчуття працюють по логарифмічному закону – це закон Вебера-Фехнера. При дослідженні сприйняття змін інтенсивності звуку було встановлено, що однакові відносні зміни інтенсивності викликають однакові зміни слухового відчуття, тобто слухове відчуття E пропорційно логарифму відносної зміни інтенсивності.

Наприклад, якщо

$$\frac{I}{I_1} = 10; \lg \frac{I}{I_1} = 1;$$

$$\frac{I_3}{I_2} = 10; \lg \frac{I_3}{I_2} = 1;$$

$$\lg \frac{I_3}{I_1} = 2.$$

Слухова система сприймає зміну інтенсивності по показнику степеня.

Для оцінки величини слухового відчуття була запропонована одиниця під назвою "Бел". Ця одиниця відповідає десятикратному відношенню інтенсивностей

$$1 \text{ Бел} = \lg \frac{I}{I_0},$$

де $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$ – нульовий рівень інтенсивності. Це значення інтенсивності на порозі чутливості на частоті 1 кГц.

Але виявилося, що така градація є занадто грубою. Тому запропонували використовувати дрібнішу одиницю - дБ.

$$1 \text{ дБ} = 0,1 \text{ Б} = 10 \lg \frac{I}{I_0}.$$

Діапазон зміни інтенсивності звуку складає 10^{14} разів, а слухове відчуття змінюється на 130 дБ. Це означає, що величина елементарного стрибка по діапазону амплітуд в середньому дорівнює 0,8 дБ, що відповідає зміні інтенсивності в 1,2 рази.

Внаслідок логарифмічного закону сприйняття звуку і широкого діапазону інтенсивностей звуків, які можна почути, було введено поняття рівня інтенсивності

$$L_{\text{дБ}} = 10 \lg \frac{I}{I_0}.$$

Оскільки інтенсивність і звуковий тиск пов'язані квадратичною залежністю, то рівень звукового тиску N визначається рівністю

$$N_{дБ} = 20 \lg \frac{P}{P_0},$$

де $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па - нульовий рівень по звуковому тиску. Це значення тиску на порозі чутливості на частоті 1 кГц.

Рівні по звуковому тиску і інтенсивності завжди рівні. Із наведених формул виходить, що зміна інтенсивності в два рази відповідає зміні рівня на 3 дБ. Кожна зміна звукового тиску в два рази призводить до зміни його рівня на 6 дБ.

Для некогерентних сигналів (сигнали різних частот - шумові, мовні і т. д.) справедливий принцип енергетичного сумування, тобто енергії сигналів можна додавати:

$$I_{\Sigma} = I_1 + I_2;$$

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \frac{I_{\Sigma}}{I_0}.$$

Для когерентних сигналів (сигнали однієї частоти):

$$I_{\Sigma} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi,$$

де φ - кут зсуву фаз між сигналами.

Частинні випадки:

1) Для синфазних сигналів: $\varphi = 0$

$$I_{\Sigma} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2},$$

$$P_{\Sigma} = P_1 + P_2.$$

2) Для сигналів у протифазі: $\varphi = 180^\circ$

$$I_{\Sigma} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2},$$

$$P_{\Sigma} = P_1 - P_2.$$

Рівні інтенсивностей сигналів можна віднімати, проте не можна додавати. Якщо потрібно знайти сумарний рівень двох сигналів, то переходять до інтенсивностей, знаходять суму і підставляють під логарифм.

В якості об'єктивної характеристики широкосмугових шумів з безперервним спектром використовуються **спектральна щільність потужності** R , яка визначає розподіл інтенсивності звуку по частоті і вимірюється у $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{Гц}}$. Чисельно вона дорівнює інтенсивності звуку в смузі ΔF шириною 1 Гц

$$R = I / \Delta F.$$

Рівень спектральної щільності потужності шуму обчислюється за формулою

$$N_{\text{дБ}} = 10 \lg \frac{P}{P_0}.$$

де R_0 - нульовий рівень спектральної щільності ($R_0 = 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{Гц}}$).

Для більшості музичних інструментів спектральна щільність потужності рівномірна до 3,5...4 кГц, а далі зменшується з крутизною 6 дБ/октаву. Діапазон частот 20...20000 Гц становить 10 октав.

Гармонійна октава – діапазон частот з відношенням частот 2:1.

Октавна шкала частот. У цій шкалі діапазон звукових частот розділений тільки на октави. Якщо в цю шкалу входить частота 1 кГц, вона називається основною шкалою. Октавна шкала може бути розділена на менші відрізки: в півоктави, третьоктави і т.д. Значення октавних частот усередині октави визначаються розрахунковим шляхом. Октавні частоти:

$$F_{\text{окт}} = 1000 \cdot 2^i,$$

де i - номер октави, від 0 до ± 5 .

Частоти усередині октав:

$$F_x = F_{\text{окт}} \cdot 2^{j/x},$$

де x - число, що вказує на скільки частин ділиться октава (2, 3, 6,...), $j = 0 \dots (x - 1)$.

У електроакустиці і аудіотехніці переважно використовується основна третиннооктавна шкала частот.

ЛЕКЦІЯ 5. ПОРОГОВІ ВЕЛИЧИНИ. ОБЛАСТЬ ЧУТНОСТІ

Дослідження здатності слухової системи сприймати і перетворювати в певні слухові відчуття (гучність, висоту, тембр та ін.) основні об'єктивні параметри звукового сигналу (інтенсивність звуку, її динамічний діапазон, частотний діапазон, часові характеристики), є головним завданням сучасної психоакустики. Встановлення меж виникнення слухових відчуттів, що називаються слуховими порогоми, є нині однією з актуальних задач.

Область чутності обмежена по частоті та по значенню тиску. По частоті - діапазоном від 20 до 20000 Гц, по тиску – від порогу чутності до больового порогу.

Поріг чутності – це величина звукового тиску (інтенсивності сигналу), нижче якої відсутнє слухове відчуття. Поріг чутності – функція частоти. Наявність порогу чутності визначається будовою слухової системи людини. Цей поріг характеризує чутливість вуха до інтенсивності звукової енергії. Величина порогу чутності залежить від типу звукових коливань, параметрів джерела звуку і умов проведення вимірювання.

Під умовами проведення вимірювання розуміють характер звукового поля:

- чи створюється воно одним гучномовцем, розміщеним перед слухачем, чи декількома джерелами, рівномірно розподіленими навколо голови;
- чи є відбиття від меж приміщення або прийняті заходи по його усуненню;
- чи робилися вимірювання мінімального тиску безпосередньо біля вушної раковини або в цій же точці за відсутності слухача (тобто у вільному полі);
- чи подавався сигнал через гучномовець або через телефон.

Зазвичай користуються результатами вимірювань, отриманими двома основними методами.

Перший метод: для вільного звукового поля (тобто в заглушеній камері), що формується одним випромінювачем, поміщеним перед слухачем. Рівень звукового тиску визначається мікрофоном, поміщеним в точку

розташування голови слухача. Вимірювання порогу чутності робиться по методу так званого балансного регулювання. Випробовуваний має можливість за допомогою перемикача міняти напрям зміни інтенсивності звуку, зменшуючи його до рівня, коли тон стає нечутним, і підвищуючи до рівня, коли тон стає чутним. Отже, регульований тон балансує між значеннями "чутний" і "не чутний".

Вимірювання проводяться на різних частотах, при цьому на кожній частоті визначається отриманий рівень. Описані вимірювання повинні проводитися за участю багатьох випробовуваних, таких, що мають здоровий слух, як тренованих (які дають менші значення порогів), так і нетренованих. Отримана у такий спосіб крива порогу чутності синусоїдальних звуків, виміряна в умовах вільного поля, показана на рис. 5.1.

Поріг чутності називають **абсолютним** при вимірюванні його на тональному звуці в повній тиші. Визначається він для людей у віці 18...20 років при розміщенні джерела звуку перед слухачем. Тривалість дії звуку має бути не менше 250 мс. Графік частотної залежності рівня абсолютного порогу чутності $N_{\text{АПЧ}}$ наведений на рис. 5.1.

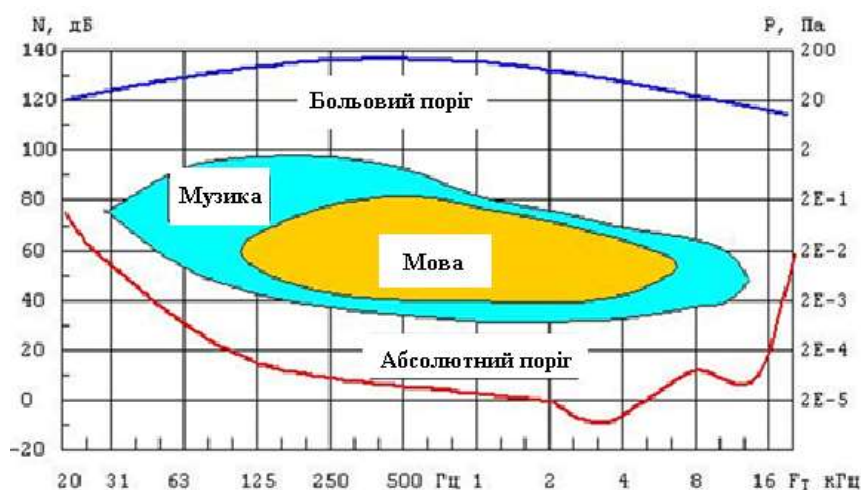


Рис. 5.1. Пороги чутності

На цьому графіку по осі абсцис відкладена частота тону, що використовувався в експерименті, а по осях ординат звуковий тиск P в

Паскалях і рівень звукового тиску N в децибелах. Нагадаємо, що рівень звукового тиску і рівень його інтенсивності завжди рівні.

Чутливість вуха максимальна на частотах від 2 кГц до 5 кГц. На цих частотах абсолютний поріг чутності менше $2 \cdot 10^{-5}$ Па. За нульовий рівень прийнятий звуковий тиск $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Слід зауважити, що звуковий тиск, що виникає внаслідок броунівського руху молекул при температурі 25 градусів, складає $5 \cdot 10^{-6}$ Па. Якби вухо було удвічі чутливіше, воно чуло б безперервний шум флуктуацій молекул повітря і струму.

Пороги чутності різні для лівого і правого вуха. Також слід зазначити, що при бінауральному прослуховуванні слухові пороги на 3 дБ нижчі, ніж при моноуральному. Результати вимірювань залежать від того, яка апаратура використовується при вимірюваннях: гучномовець або телефони. При використанні телефонів абсолютний поріг чутності вище на 5...10 дБ.

З віком слухові сприйняття людей притупляються, причому в першу чергу і швидше всього на високих частотах. Зазвичай на частоті 10 кГц чутливість вуха у 60-річної людини на 20 дБ нижче, ніж у 20-річного.

Другий метод: сигнали подаються в навушники, звуковий тиск вимірюється в слуховому проході біля барабанної перетинки. При підвищенні і пониженні частоти чутливість слуху знижується і пороги чутності відповідно підвищуються.

Виділяють також **поріг неприємного відчуття**. Вважається, що він виникає на частоті 1000 Гц при значенні тиску 10 Па (відповідає рівню 100-120 дБ).

При значеннях тиску від 60 до 80 Па (120-130 дБ) на частоті 1000 Гц виникає відчуття тиску на вуха (аналогічно відчуттю закладеності у вухах під час польоту на літаку або як неприємне лоскотання) – ця величина називається **порогом торкання**. Тиск від 150 до 200 Па (140 дБ) чинить біль і називається **больовим порогом**. При перевищенні значень больового порогу відбувається розрив барабанної перетинки.

Слухова система людини пристосована до звуків малої і середньої інтенсивності з рівнем тиску не вище 90 дБ. Звуки з рівнем тиску більше 75 дБ призводять до зміни порогів чутності і навіть до повної глухоти. Міра ушкодження пропорційна часу дії. Іноді поріг чутливості відновлюється через 16...20 годин.

Абсолютні частотні пороги

Якщо на рис. 5.1 подивитися на криві больових порогів і криві абсолютної чутності, то можна бачити, що якщо продовжити ці криві, то вони нібито перетинаються. Тобто щоб досягти порогів чутності на найнижчих і найвищих частотах, потрібні вже настільки високі рівні, що вони відразу будуть співпадати з больовими порогамі, не створюючи відчуття звуку.

Таким чином, тільки звуки, що лежать в діапазоні частот 20...20000 Гц, сприймаються у вигляді слухових відчуттів.

Вимірювання показали, що звуки з частотою 20 кГц можуть почути лише деякі люди, причому в дуже молодому віці. В середньому віці чутливість слуху до високих частот знижується кожні 10 років на 1000 Гц. Приблизно до 60 років середній поріг по високих частотах становить 12 кГц у жінок, і 5,6 кГц - у чоловіків.

Проте якщо подивитися на рис.5.1, то можна побачити, що музичні і мовні сигнали займають тільки частину чутної області, як по частоті, так і по амплітуді.

Діапазон тисків: мова від 40 до 84 дБ,
музика від 35 до 100 дБ.

Смуга частот: мова від 100 до 7000 Гц,
музика від 31 до 15000 Гц.

Вікова зміна частотних порогів призводить до деякого зменшення яскравості звучання обертонів, але не заважає слухати музику і мову.

Диференціальні пороги

Обмежені можливості слухової системи визначаються не лише наявністю абсолютних порогів чутності, але і обмеженою роздільною здатністю слуху. **Роздільна здатність слуху** – це мінімальні зміни звукового тиску, частоти, часових інтервалів (і відповідно гучності, висоти, тривалості), які можуть бути розрізнені слухом. Роздільну здатність називають ще **диференціальним порогом сприйняття**.

Диференціальний поріг сприйняття по амплітуді

Вимірювання диференціального порогу сприйняття по амплітуді (звуковому тиску) можна проводити двома способами.

При першому способі використовують два синусоїдні сигнали однакової частоти, але різного рівня. Наприклад, подавався сигнал з частотою 1000 Гц з рівнем звукового тиску 40 дБ, і другий сигнал тієї ж частоти з рівнем, що змінюється. При почерговому прослуховуванні пари таких сигналів слухач відмічав, який з сигналів звучить голосніше. Якщо різниця в рівнях між сигналами досить велика (наприклад, 40 і 60 дБ), то усі 100 % слухачів відмітять цю різницю, але якщо різниця в рівнях зменшуватиметься, то помічати різницю між сигналами буде все менша кількість слухачів. Різниця в рівнях, яку помічає 75% слухачів, береться за диференціальний слуховий поріг по рівню звукового тиску (по амплітуді). Аналогічні вимірювання, повторювані для різних частот і різних рівнів звукового сигналу, дозволили отримати характеристики залежності диференціальних порогів чутності JND від частоти і загальної інтенсивності звукового сигналу (рис.5.2) .

Як видно з рисунка, ці пороги залежать від частоти сигналу: найменші значення спостерігаються на середніх частотах (500...4000 Гц), на низьких і високих частотах вони зростають. Наприклад, при загальному рівні 60 дБ JND для частоти 1000 Гц складає 0,8 дБ, а для частоти 200 Гц 1,3 дБ. Крім того, вони

сильно залежать від загального рівня сигналу чим голосніше сигнал, тим меншу різницю між сигналами можна почути.

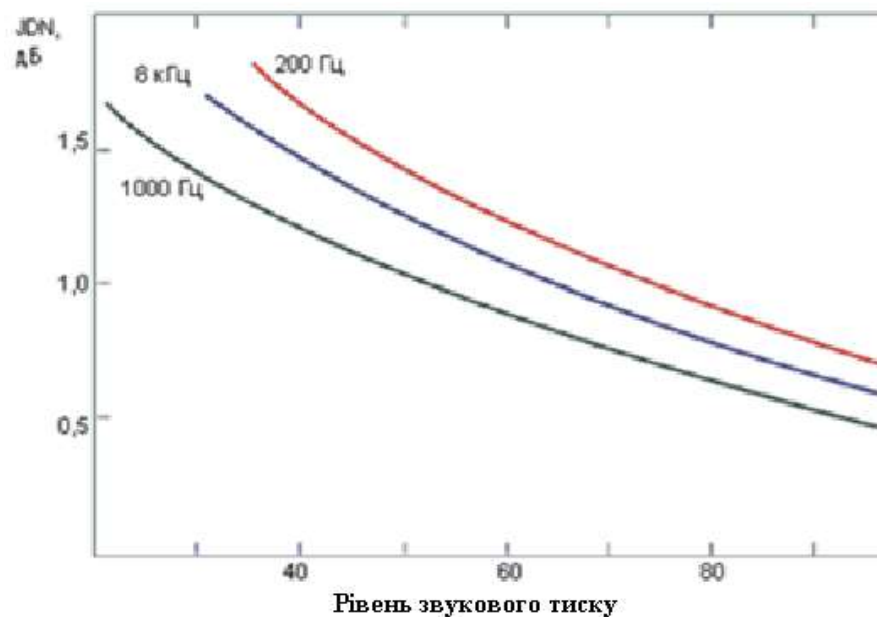


Рис. 5.2. Залежності диференціальних порогів чутності JND від частоти і загальної інтенсивності звукового сигналу

При *другому способі вимірювання* використовувався амплітудно-модульований синусоїдальний сигнал, який сприймається на слух як сигнал з невеликою зміною гучності. Найбільша чутливість слуху була відмічена при частотах модуляції близько 4 Гц, у зв'язку з чим подальші виміри робилися при цій частоті. Досліди зводять до визначення рівня звукового тиску, при якому стають помітними коливання гучності, обумовлені модуляцією. Результати представлені на рис.5.3 у вигляді сімейства кривих, які можна назвати **кривими рівної помітності амплітудної модуляції**. Чим голосніше сигнал, тим меншу зміну амплітуди модулюючого сигналу можна помітити.

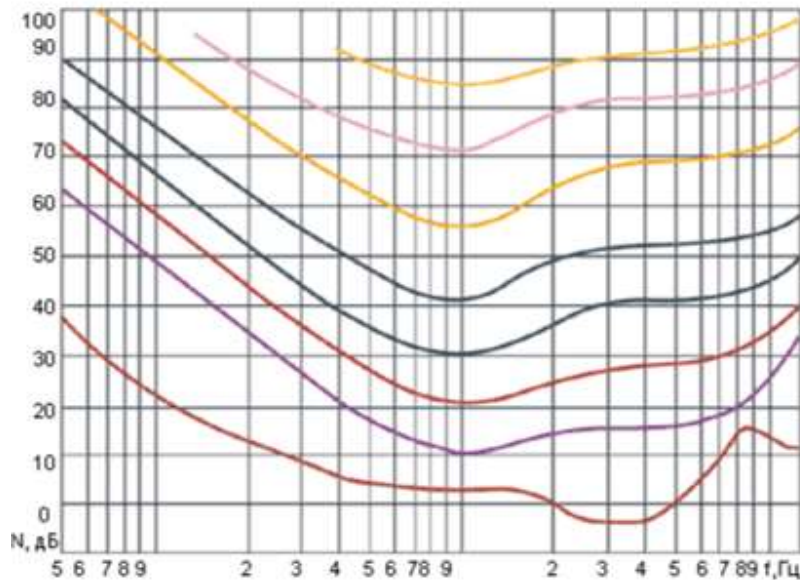


Рис. 5.3. Криві рівної помітності амплітудної модуляції

Частотні диференціальні слухові пороги

Частотна роздільна здатність слуху може бути визначена шляхом прямих експериментів: вмикають два синусоїдальні сигнали однакової інтенсивності, і слухача просять змінювати частоту сигналу відносного опорного, доки не буде чутна різниця по висоті. Частотна роздільна здатність може бути також оцінена по мінімальних змінах частоти, відчутних на слух при частотній модуляції.

Пороги чутності коливань висоти тону залежать від частоти і інтенсивності сигналу. У області частот до 1000 Гц при загальному рівні звуку 80 дБ диференціальний частотний поріг складає приблизно 3 Гц (в деяких роботах отримані результати до 1 Гц). Потім пороги починають зростати на 4000 Гц приблизно до 10 Гц, на вищих частотах визначення відмінностей по висоті різко зменшується.

Всього слухова система розрізняє 620 градацій висоти тону (140 градацій в діапазоні до 500 Гц і 480 градацій в діапазоні від 500 Гц до 16 кГц).

ЛЕКЦІЯ 6. КРИТИЧНІ СМУГИ СЛУХУ. ГУЧНІСТЬ. РІВЕНЬ ГУЧНОСТІ

При сприйнятті звуку слуховий апарат людини розділяє його на частотні групи, що називаються **критичними смугами**.

В діапазоні від 20 до 16000 Гц кількість критичних смуг дорівнює 24 (тобто вся завитка поділяється на 24 зони і одна критична зона відповідає 1,3 мм на основній мембрані).

Ширина цих смуг змінюється від низьких до високих частот нерівномірно: 80 Гц, 100 Гц, 100 Гц, 100 Гц, 110 Гц, 120 Гц, 140 Гц, 150 Гц, 160 Гц,

Приклад.

Якщо $f_0=100$ Гц, то $\Delta f_{кр}=90$ Гц;

Якщо $f_0=1000$ Гц, то $\Delta f_{кр}=160$ Гц;

Якщо $f_0=5000$ Гц, то $\Delta f_{кр}=700$ Гц;

Якщо $f_0=10000$ Гц, то $\Delta f_{кр}=1200$ Гц;

Якщо $f_0=20000$ Гц, то $\Delta f_{кр}=5000$ Гц.

Стандартом MPEG (Moving Picture Experts Group) – група фахівців у підпорядкуванні ISO (International Organization for Standardization), що займається виробленням стандартів стиснення цифрового відео і аудіо встановлені **нижні межі** критичних смуг слуху : 20, 100, 200, 300, 400, 510, 630, 770, 920, 1080, 1270, 1480, 1720, 2000, 2320, 2700, 3150, 3700, 4440, 5300, 5400, 7700, 9500, 12000, 16000 Гц.

В межах частотних груп слух інтегрує збудження по частоті і не сприймає весь спектральний склад. Також слух реагує не на загальну потужність шуму, а на потужність шуму в критичних смугах. Наприклад, при дії широкосмугового шуму слух нібито перетворює суцільний спектр на дискретний. Такий спектр складається з кінцевого числа складових по числу критичних смуг слухового апарату.

Критичні смуги слуху використовують в якості одиниці суб'єктивної висоти тону, яка називається **барк**.

Гучність. Рівень гучності

Гучністю називається суб'єктивна слухова характеристика, що дозволяє слуховій системі класифікувати звуки за шкалою від тихих до гучних. Об'єктивною характеристикою звуку, що корелює з гучністю є звуковий тиск. Гучність залежить від значення звукового тиску, частоти, спектрального складу, тривалості звуку і його локалізації в просторі.

Для оцінки гучності прийнята спеціальна одиниця **сон**.

Гучність 1 сон – це гучність тонального звуку з частотою 1 кГц з рівнем 40 дБ.

Приклад

Максимальна гучність звуку в кабіні літака 600...800 сон, гучність шуму в потязі метро 30...45 сон, гучність звичайної розмови 3...5 сон, гучність шуму у бібліотеці 0,2...0,4 сона.

У випадку широкосмугового шуму при великих рівнях звукового тиску гучність шуму значно перевищує гучність тону.

Наприклад, для тонального сигналу з частотою 1 кГц при рівні звукового тиску 60 дБ його гучність складає 4 сона, а гучність широкосмугового шуму з таким же рівнем тиску майже в 4 рази більше і дорівнює 15 сон.

При малих рівнях звукового тиску (близько 15 дБ) гучності тональних сигналів і широкосмугових шумів практично однакові і дорівнюють 0,06 сона. При ще менших звукових тисках гучність широкосмугового шуму стає менше гучності тону.

Значення звукового тиску і інтенсивності тонального звуку, виміряні приладами, не дають уявлення про відчуття гучності. Між тим людина може досить точно встановити рівність гучності двох звуків будь-якого частотного складу. Поняття рівень гучності дозволяє визначити гучність одного звуку відносно іншого, прийнятого за опорний.

За **одиницю рівня гучності** приймають рівень інтенсивності чистого тону частотою 1000 Гц. Ця одиниця рівня гучності називається **фон**. Рівень гучності

позначають символом G. Чисельно рівень гучності у фонах дорівнює рівню інтенсивності звуку в децибелах на частоті 1000 Гц. Рівень гучності тонів інших частот визначають по графіку кривих рівного рівня гучності. Ці графіки, називаються ізофонами (рис. 6.1).

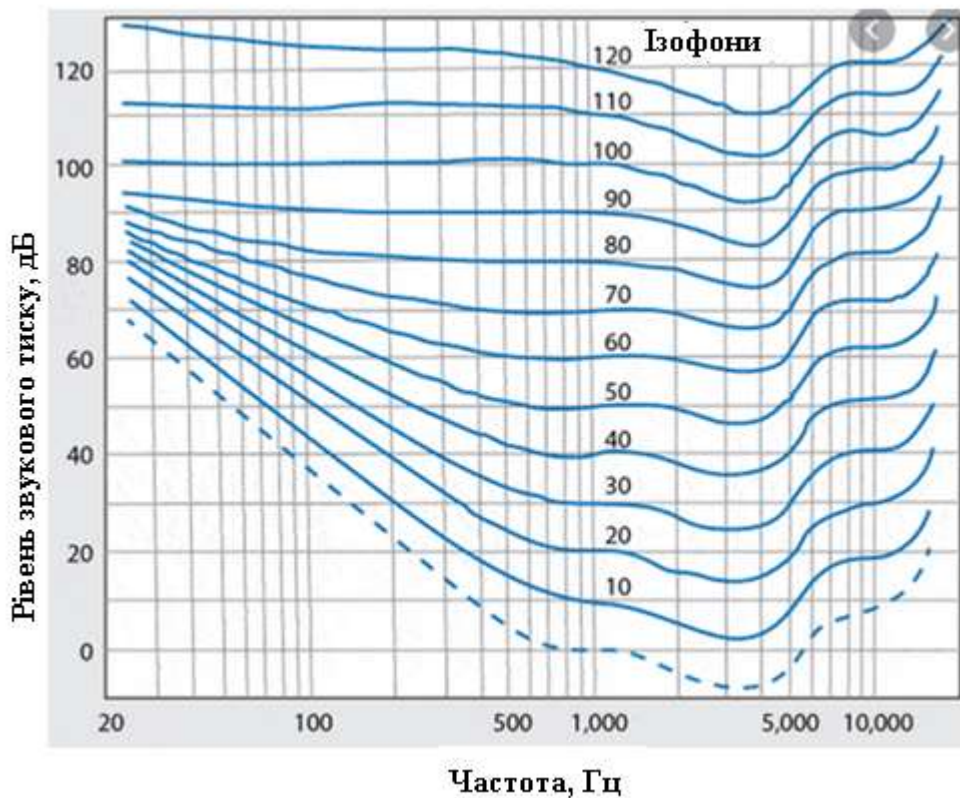


Рис. 6.1. Криві рівного рівня гучності

На цих графіках представлена частотна залежність рівня звукового тиску при різних рівнях гучності від 3 до 120 фон.

Кожна крива отримана шляхом суб'єктивного порівняння гучності синусоїдального звуку довільної частоти з гучністю звуку з частотою 1 кГц. Якщо звук з частотою 100 Гц має рівень 60 дБ рівногучний зі звуком з частотою 1 кГц і рівнем 40 дБ, то рівень гучності звуку з частотою 100 Гц дорівнює 40 фон.

Для усіх ізофон характерне невелике зниження в області частот 3...4 кГц і рівномірний підйом при пониженні частоти нижче 500 Гц. Величина підйому на різних рівнях неоднакова. При підвищенні рівня ізофони випрямляються, і

підйом стає менш крутим. Це означає, що частотна характеристика слуху при великих рівнях звукового тиску більше рівномірна, ніж при малих. При малих рівнях гучності форма ізофон наближається до кривої абсолютного порогу чутності, якій відповідає рівень гучності 3 фон.

Приклад

Максимальний рівень гучності в кабіні літака 125...130 фон, в потязі метро 85...90 фон, звичайна розмова 55...60 фон, у бібліотеці 25...30 фон.

Значення гучності в сонах визначається за графіками (рис. 6.2) або за формулами

$$S, \text{ сон} = 2^{\frac{G, \text{ фон} - 40}{10}}, G > 40 \text{ фон.}$$

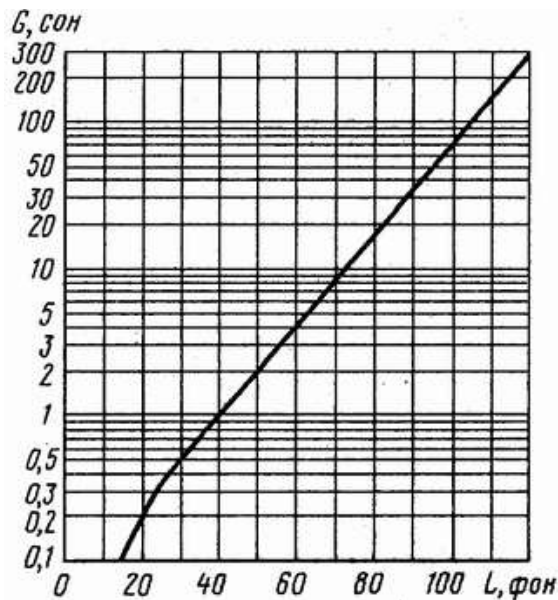


Рис. 6.2. Графік зв'язку гучності в сонах і фонах

Залежність гучності від рівня звукового тиску є нелінійною, у неї логарифмічний характер. При збільшенні рівня тиску звуку на 10 дБ гучність його зростає в 2 рази. Це означає, що рівням гучності 40, 50 і 60 фон відповідає гучність 1, 2 і 4 сона.

ЛЕКЦІЯ 7. ГУЧНІСТЬ СКЛАДНИХ ЗВУКІВ. ЧАСОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛУХУ. АДАПТАЦІЯ СЛУХУ

На практиці при записі, монтажі та проведенні інших видів робіт із звуковим матеріалом важливо враховувати залежність відчуття гучності від спектрального складу акустичних звукових сигналів (мовних, музичних, шумових та ін.).

Відомо, що при одному і тому ж рівні звукового тиску широкосмугові сигнали здаються голоснішими, ніж вузькосмугові.

Рівень гучності при розширенні смуги шуму до значення, що відповідає *критичній смузі слуху* практично залишається незмінним, а коли ширина смуги стає ширше за критичну смугу слуху – рівень гучності стрімко зростає. Відмінність механізмів обробки сигналу усередині і поза критичними смугами має принципове значення для визначення гучності складних звуків.

Механізм слухового аналізу гучності сигналів, включає наступні послідовні етапи обробки звукового сигналу:

1. Фільтрація сигналу зовнішнім вухом (вушною раковиною і слуховим каналом).

Зовнішнє вухо здійснює обробку звукового сигналу залежно від напрямку надходження звуку, збільшуючи рівень сигналу в області 3 кГц за рахунок дифракції на вушній раковині і резонансів у зовнішньому слуховому каналі.

2. Фільтрація сигналу середнім вухом.

3. Фільтрація за допомогою лінійки смугових фільтрів на базилярній мембрані.

У внутрішньому вусі відбувається спектральний аналіз слухового сигналу, що надійшов, при цьому кожній частоті відповідає місце максимального зміщення базилярної мембрани, що аналогічно механізму обробки сигналу лінійкою смугових фільтрів. Смуги пропускання "слухових" смугових фільтрів приблизно відповідають ширині критичних смуг і змінюються залежно від частоти.

Форма передатної функції кожного з цих слухових фільтрів, і її зміна зі збільшенням амплітуди сигналу показані на рис. 7.1 (по горизонтальній осі відкладено число критичних смуг). Як видно з рис. 7.1, збудження мембрани стає усе більш несиметричним, і площа під кривою розширюється.

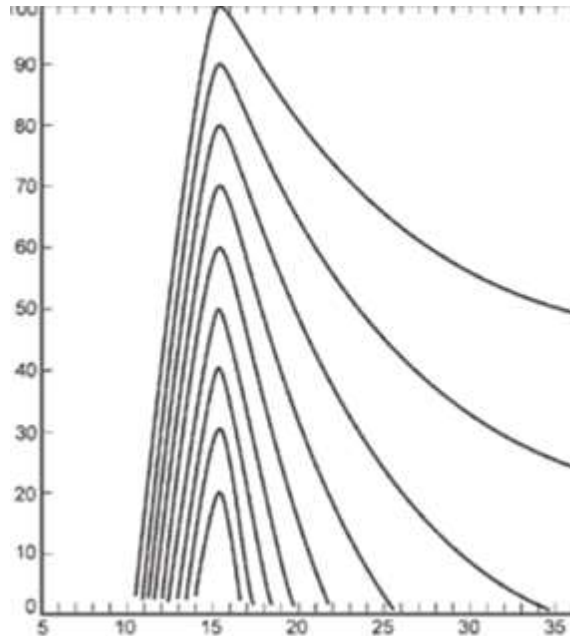


Рис. 7.1. Передатні функції слухових фільтрів

4. Перетворення збудження на базилярній мембрані в криві розподілу питомої (гучність усередині критичної смуги) гучності.

При коливаннях базилярної мембрани, у волоскових клітинах органу Корті (що знаходиться на мембрані) генерується електричний потенціал, і збуджуються потоки імпульсів в нервових клітинах. При збільшенні інтенсивності сигналу швидкість імпульсів збільшується в одиничному нерві, що відповідає цьому місцю на мембрані, і доходить до насичення (поріг – 1000 імпульсів в секунду), потім починає виникати збудження в сусідніх нервових волокнах відповідно до збільшення площі під кривою збудження (рис. 7.1). Відчуття гучності кодується збільшенням числа розрядів в одиничному нерві і збільшенням кількості нервових волокон, в яких виникає збудження, відповідно до зміни площі під кривою збудження.

5. Отримання інтегральної оцінки питомої гучності.

На підставі проведених експериментів була висунута гіпотеза, що слухова система інтегрує площу під кривою збудження на базилярній мембрані з урахуванням розподілу нервової активності.

Таким чином, усередині кожної критичної смуги відбувається інтеграція енергії незалежно від виду звукового сигналу. Фрагмент спектру шуму (чи тональні сигнали), якщо вони знаходяться усередині критичної смуги і мають однаковий рівень інтенсивності (звукового тиску), створюють однаковий рівень гучності.

Тому, коли звуковий сигнал має складний спектральний склад або одночасно звучать декілька сигналів, визначення їх сумарної гучності відбувається трьома різними способами, залежно від співвідношення їх частот або обертонів.

1. Якщо сигнали близькі по частоті, тобто знаходяться усередині однієї критичної смуги (сприймаються як один сигнал).

Знаходимо сумарну інтенсивність цих сигналів $I_{\Sigma} = I_1 + I_2$ (для некогерентних) або $I_{\Sigma} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi$ (для когерентних).

Знаходимо їх сумарний рівень інтенсивності (дорівнює рівню звукового тиску)

$$L_{\Sigma, \text{дБ}} = 10 \lg \frac{I_{\Sigma}}{I_0}.$$

За допомогою кривих рівної гучності визначаємо сумарний рівень гучності

$$L_{\Sigma, \text{дБ}} \rightarrow G, \text{ фон}.$$

Переходимо від сумарного рівня гучності до сумарної гучності

$$G, \text{ фон} \rightarrow S, \text{ сон}.$$

Приклад

На скрипці виконується певна нота з рівнем звукового тиску $L_1 = 60$ дБ з частотою 880 Гц (Ля другої октави). Це, як впливає з кривих рівної гучності (рис.6.1), відповідає рівню гучності $G_1 = 60$ фон. Для визначення гучності цього звуку скористаємося формулою: $S = 2^{\frac{G, \text{ фон} - 40}{10}} = 2^{\frac{60 - 40}{10}} = 4 \text{ сон}.$

Якщо тепер разом гратимуть десять скрипок, то створювана ними гучність визначається таким чином: інтенсивність звуку однієї скрипки I_1 , інтенсивність звуку десяти скрипок $I_{\Sigma} = 10I_1$.

При цьому сумарний рівень інтенсивності рівний:

$$L_{\Sigma, \text{дБ}} = 10 \lg \frac{I_{\Sigma}}{I_0} = 10 \lg \frac{10I_1}{I_0} = 10 \lg \frac{I_1}{I_0} + 10 \lg 10 = 10 \lg \frac{I_1}{I_0} + 10 \text{дБ}.$$

Тобто сумарна інтенсивність (рівень звукового тиску) збільшився на 10 дБ.

Оскільки початковий рівень звукового тиску був 60 дБ, то сумарний рівень звукового тиску тепер дорівнюватиме 70 дБ, що відповідає рівню гучності 70 фон (див. рис.), а отже гучність дорівнює 8 сон.

Т.ч., коли замість однієї скрипки (чи будь-якого іншого джерела сигналу) гратимуть десять скрипок, гучність виросте тільки в два рази.

Це правило можна сформулювати інакше: ***при збільшенні загального рівня звукового тиску на 10 дБ сприймана гучність подвоюється.***

Аналогічно розраховується загальна гучність, якщо є два вузькосмугові шуми з близькими частотами. Якщо рівень кожного з шумів 60 дБ, то при складанні інтенсивностей сумарний рівень буде 63 дБ, і гучність виросте від 4 сон до 4,92 сона.

2. Якщо сигнали мають частоти, що знаходяться в сусідніх критичних смугах (будемо чути найгучніший сигнал).

В цьому випадку сумарна гучність дорівнює сумі гучності кожної із складових.

Алгоритм розрахунку:

$$L_{1, \text{дБ}} \rightarrow G_{1, \text{фон}} \rightarrow S_{1, \text{сон}}.$$

$$L_{2, \text{дБ}} \rightarrow G_{2, \text{фон}} \rightarrow S_{2, \text{сон}}.$$

Сумарна гучність

$$S_{\Sigma} \rightarrow S_1 + S_2.$$

Звідси випливає, що при звучанні сигналів з частотами, рознесеними ширше за критичну смугу, сумарна гучність буде більше. Наприклад, якщо два вузькосмугові шуми мають гучність по 4 сона, але частоти їх рознесені (600 і 1200 Гц), то сумарна гучність буде 8 сон (а не 4,92 сона, як в попередньому прикладі), що відповідає рівню гучності 70 фон.

3. Якщо частоти різних сигналів рознесені по частоті один від одного досить далеко - на одну чи більше критичних смуг (увага фокусується на якомусь одному компоненті - найгучнішому або найвищому, а загальна гучність сумарного сигналу сприймається приблизно рівною цьому компоненту).

В даному випадку сумарна гучність визначається за формулою:

$$S_{\Sigma} \rightarrow S_{\max} + 0,3 \sum_i S_i,$$

де S_{\max} – гучність самого голосного звуку, $\sum_i S_i$ – сума гучностей всіх інших сигналів.

Часові характеристики слуху

Слуховий апарат людини є інерційним – при зникненні звуку слухове відчуття зникає не відразу, а поступово, зменшуючись до нуля. Час, протягом якого відчуття по рівню гучності зменшується на 9...10 фон називається **сталюю часу слуху**. В середньому вона дорівнює 30...50 мс.

Якщо до слухача надходять два короткі звукові імпульси, однакові по складу і рівню, але один з них надходить з часовою затримкою, то вони будуть сприйматися зливо, якщо час затримки не перевищує 50 мс. При великих значеннях часу затримки обидва імпульси сприймаються окремо. Це явище називається **луною**, воно проявляється, коли різниця ходу прямого і відбитого звуків більше 18 м.

Якщо рівень звуку, що затримується, набагато менше рівня першого, то він не буде прийнятий окремо, навіть якщо час затримки більше 50 мс. Це обумовлено ефектом маскування – відчуття від першого звуку маскує другий.

До часових характеристик слуху відноситься явище *післямаскування* – слабкі звуки, що йдуть відразу після гучних звуків, виявляються повністю або частково замаскованими із-за післядії попереднього звуку.

До часових характеристик слуху відноситься і *час встановлення висоти тону звуку*. Для того, щоб слух міг приблизно оцінити висоту звуку, потрібно два-три періоди коливань. На низьких частотах час встановлення складає близько 30 мс, на високих частотах – він дещо менше.

Адаптація слуху

При дії на барабанну перетинку вуха досить тривалого звуку великої інтенсивності відчуття гучності звукового сигналу поступово зменшується. Це означає, що під час дії тривалого гучного звуку знижується чутливість вуха. Після припинення дії звуку чутливість слуху поступово відновлюється. Це явище називається *адаптацією слуху*.

Явище адаптації слуху пояснюється рис. 7.2 і 7.3. На цих рисунках наведена дія звуку у вигляді імпульсів тривалістю по 2 хвилини на чутливість слуху. При рівні звукового тиску 94 дБ (рис. 7.2, а) відбувається плавне зниження рівня гучності з 94 до 85 фон (рис. 7.2, б). Швидкість зменшення рівня гучності за часом від 0 до 40 с висока, потім вона зменшується майже до нуля.

При подальшому стрибкоподібному зростанні звукового тиску на 6 дБ (рис. 7.2, б) рівень гучності спочатку зростає на 9 фон, а потім знову починає зменшуватися. Проте, зменшення рівня гучності в цьому випадку помітно менше з 95 до 88 фон. Це означає, що міра адаптації тим вище, чим голосніше стомлюючий звук.

На рис. 7.3,б показана зміна рівня гучності при стрибкоподібному зменшенні звукового тиску з 94 до 85 дБ. При цьому стрибок зменшення рівня гучності складає майже 20 фон. Потім відбувається адаптація слуху до тиші і чутливість вуха частково відновлюється, а рівень гучності через 2 хвилини зростає на 12 фон.

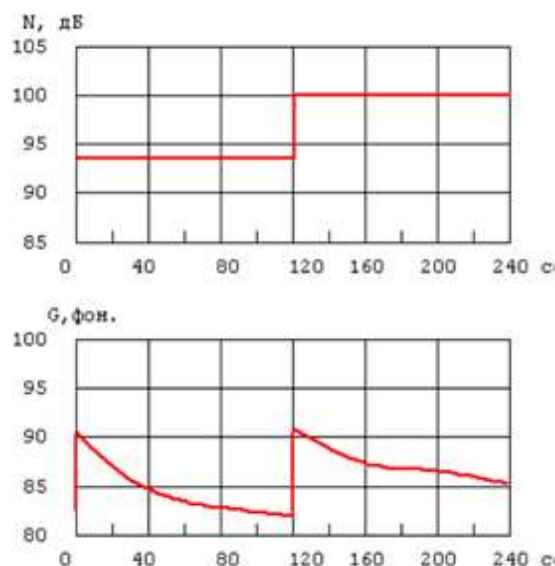


Рис. 7.2. Адаптація слуху при збільшенні рівня гучності

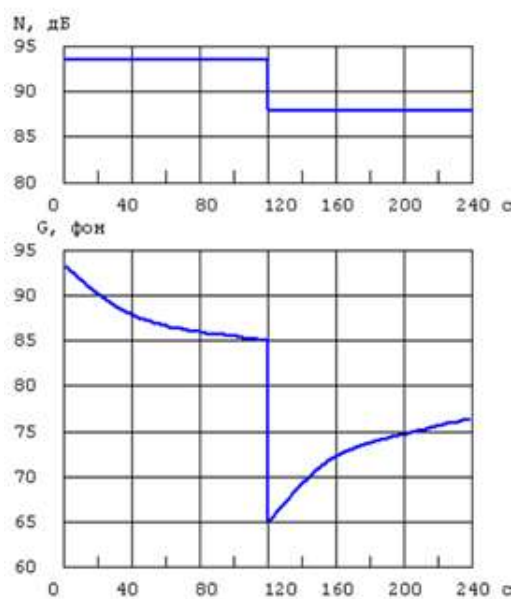


Рис. 7.3. Адаптація слуху при зменшенні рівня гучності

Таким чином, адаптація проявляється у вигляді втрати чутливості слуху при досить тривалій дії гучного звуку і відновленні її при зменшенні гучності стомлюючого звуку. Захисна здатність вуха має інерцію – вона починає працювати через 30...40 мс після початку звуку. Повний захист слуху від дії високих рівнів не досягається навіть за 150 мс. Тому для слуху найбільш небезпечні дуже короткі гучні звуки.

ЛЕКЦІЯ 8. МАСКУВАННЯ ЗВУКУ

Ефект маскування пов'язаний з процесом взаємодії сигналів, що призводить до зміни сприйняття сигналу у присутності іншого сигналу: змінюється гучність або тембр (змінюється сприйняття якихось окремих спектральних ознак сигналу), або сигнал взагалі перестає бути чутним (наприклад, мова на фоні потягу, що проходить). Така взаємодія тонів постійно відбувається в мові, де поодинокі тони практично не вживаються, і в музиці.

Процеси маскування відбуваються у вищих відділах головного мозку. Уявимо собі ситуацію: люди розмовляють. Периферична слухова система приймає звукові сигнали, обробляє і направляє у вищі відділи головного мозку, де вони розпізнаються і оцінюються. Якщо в якийсь момент мови виникає сильний шум, то периферична слухова система продовжує приймати обидва сигнали – мову і шум і направляє їх в мозок. Проте в певних відділах мозку мовні сигнали перестають сприйматися (не ідентифікуються), і обробляється тільки шум.

Маскування – це ефект, коли при одночасній дії на слух двох звуків один з них може не прослухуватися на фоні іншого.

Маскуючу дію різних звуків виявляють шляхом визначення підвищення порогу чутності досліджуваних тонів $N_{ПЧ}$ відносно абсолютного порогу чутності $N_{АПЧ}$ (поняття порогу чутності і рівня порогу чутності тотожні). Коефіцієнт маскування K_M розраховується в децибелах як різниця рівнів цих двох порогів

$$K_M = N_{ПЧ} - N_{АПЧ}.$$

1. Маскування чистим тоном. На рис. 8.1 наведені криві маскування досліджуваних тонів, коли маскуючим звуком є також тон, але з фіксованою частотою F_M і заданим рівнем інтенсивності N_M .

На цьому рис. 8.1 по осі ординат відкладений рівень порогу чутності маскованого тону $N_{ПЧ}$, а по осі абсцис – його частота F_T і частота маскуючого

звучу F_M . По цих кривих для заданих значень N_M , F_M і F_T визначається поріг чутності маскованого тону F_T і розраховується коефіцієнт маскування тонального звуку чистим тоном K_M (за наведеною вище загальною формулою для коефіцієнта маскування K_M).

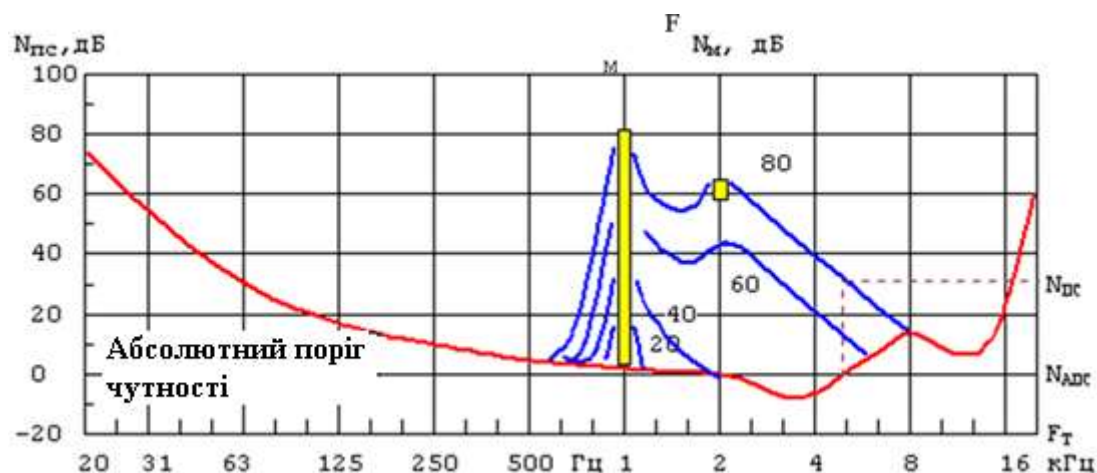


Рис. 8.1. Криві порогу чутності тону з частотою F_T при маскуванні тоном з частотою $F_M=1$ кГц

Властивості маскування чистим тоном:

- маскування тим більше, чим ближче розміщені частоти F_T і F_M ;
- коефіцієнт маскування збільшується по мірі зростання рівня інтенсивності маскуючого тону N_M (маскування охоплює ширший частотний діапазон);
- маскування сильніше діє в області високих частот, тому в якості маскуючого доцільніше використовувати низькочастотні сигнали;
- зміщення маскуючого звуку по частоті призводить до зміни форми кривої маскування.

Якщо частота тону F_T дорівнює подвоєній, потроєній і вище частоті маскуючого тону F_M , то виникають биття, які тим помітніше, чим більше рівень інтенсивності маскуючого тону.

2. Маскування вузькосмуговим шумом. При маскуванні тону з частотою F_T вузькосмуговим шумом з центральною частотою F_M і рівнем інтенсивності N_M (рис. 8.2) криві маскування мають наступні відмінності:

- немає биття і провалу коефіцієнта маскування на середній частоті маскуючого звуку;
- максимум маскування на 4 дБ нижчий за максимум рівня інтенсивності маскуючого шуму.

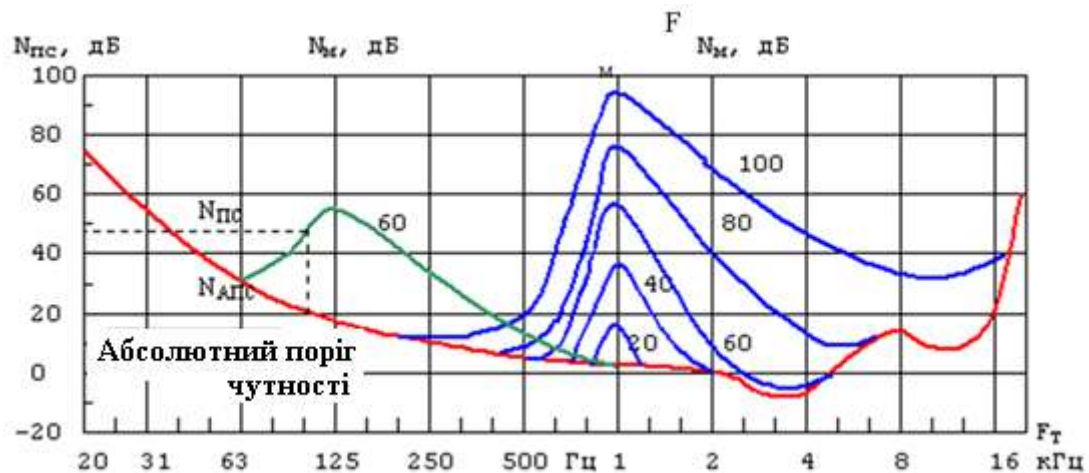


Рис. 8.2. Криві порогу чутиності тону з частотою F_T при маскуванні вузьким смуговим шумом з середньою частотою $F_{CP}=1$ кГц

Для тональних звуків частотою вище 1 кГц маскуюча дія шуму значна, в той час як сигнали з частотами на октаву нижче за частоту F_M практично не маскуються.

3. Маскування тональних звуків широкосмуговим білим шумом. При маскуванні тонального сигналу білим шумом криві маскування значно змінюються (рис. 8.3):

- замість рівня інтенсивності маскуючого звуку для характеристики потужності шуму використовується рівень спектральної щільності потужності $N(R)$ білого шуму;
- на частотах нижче 500 Гц криві маскування йдуть горизонтально,
- на частотах вище 500 Гц поріг чутиності підвищується на 3 дБ/октаву і при збільшенні частоти в 10 разів поріг зростає на 10 дБ. Така залежність пояснюється тим, що органи слуху реагують не на загальну потужність, а на потужність шуму в критичних смугах слуху. Нижче 500 Гц все критичні смуги

слуху мають однакову ширину, тому поріг чутності від частоти не залежить. В області частот, де ширина критичних смуг слуху пропорційна середній частоті, при збільшенні частоти в 10 разів поріг чутності зростає на 10 дБ.

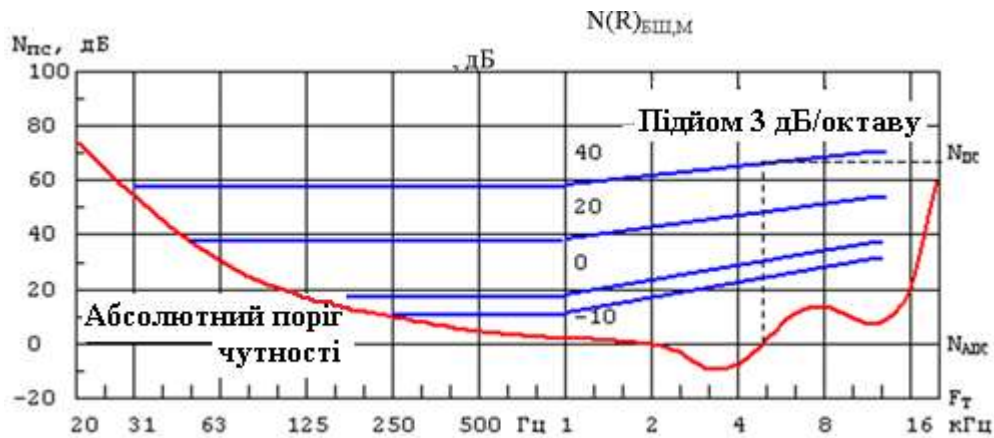


Рис. 8.3. Криві порогу чутності тону з частотою F_T при маскуванні білим шумом

При маскуванні шумом слух розділяє широкопasmовий шум на частотні групи і може розпізнати тон з частотою F_T лише тоді, коли його рівень всього на декілька дБ нижче за рівень маскуючого шуму в частотній групі, де знаходиться тон. При маскуванні тону білим шумом з рівнем спектральної щільності потужності $N(R)$ коефіцієнт маскування визначається як різниця між величинами порогу чутності тону і абсолютного порогу чутності цього ж звуку

$$K_{М\ ТШ} = N_{ПЧ} - N_{АПЧ}$$

4. Рівномірно маскуючий шум. Це шум, який здійснює однакове маскування тональних звуків у всьому звуковому діапазоні частот. Спектральна щільність потужності цього шуму $N(R)_{РМШ}$ до частоти 500 Гц така ж як в білому шуму $N(R)_{БШ}$. Вище 500 Гц спектральна щільність потужності $N(R)_{РМШ}$ зменшується пропорційно частоті, як у рожевого шуму.

Криві маскування тонального звуку рівномірно маскуючим шумом наведені на рис. 8.4. Коефіцієнт маскування визначається аналогічно маскуванню білим шумом.

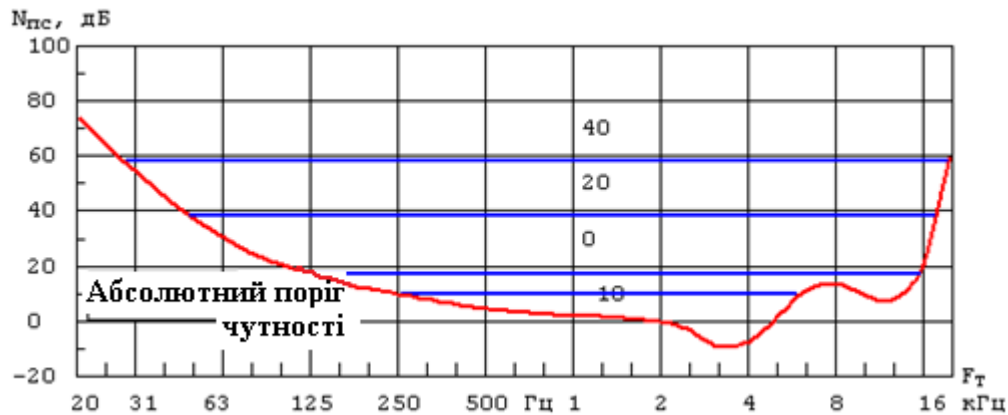


Рис. 8.4. Криві порогу чутності тону з частотою F_T при маскуванні рівномірно маскуючим шумом

5. Маскування тону шумом в межах критичної смуги слуху. В даному випадку передбачається, що ширина смуги білого шуму дорівнює ширині критичної смуги слуху і маскований тон знаходиться посередині цієї смуги. В даному випадку величина маскування оцінюється за допомогою коефіцієнта маскування K_M , що показує, на скільки дБ поріг чутності маскованого тону з частотою F_T нижче за рівень інтенсивності маскуючого шуму $N_{МШ}$ в даній критичній смузі слуху. Цей коефіцієнт маскування тону шумом $K_{МТШ}$ визначається рівністю:

$$K_{МТШ} = N_{Пч} - N_{МШ},$$

де $N_{Пч}$ – рівень порогу чутності тону при маскуванні його шумом з рівнем інтенсивності $N_{МШ}$.

Істотно гірше виявляється маскування за ситуації, коли тон маскує шум із смугою, рівною критичній смузі слуху. В цьому випадку коефіцієнт маскування визначається рівністю

$$K_{МШТ} = N_{ПШ} - N_{МТ},$$

де $N_{\text{ПСШ}}$ і $N_{\text{МТ}}$ – відповідно поріг чутності шуму, що маскується тоном, і рівень маскуючого тону в децибелах. Цей коефіцієнт маскуванню змінюється від мінус 5,7 дБ на найнижчих частотах до значення мінус 35,40 дБ для самих верхніх частот.

Маскування в часовій області

Досі ми визначали коефіцієнт маскуванню в припущенні, що маскований і маскуючий звуки надходять до слухової системи одночасно. Проте, виникають ситуації, коли досить гучні звуки маскують звуки, що йдуть за ними. Це обумовлено адаптацією слуху. В деяких випадках маскуються попередні звуки.

Такий вид маскуванню, коли звуки не перекриваються в часі, називається **часовим маскуванню**. Виділяють передмаскування і післямаскування.

Післямаскування проявляється через 100-200 мс після закінчення маскуючого звуку. Передмаскування проявляється значно швидше – близько 10 мс.

Властивості часового маскуванню:

- післямаскування ефективніше, ніж передмаскування;
- більш високий рівень маскуванню спостерігається, при невеликому часовому інтервалі між маскуючим і маскованим звуком;
- маскуванню виражене сильніше коли маскуючий і маскований звуки подаються в одне вухо;
- рівень маскуванню різко зменшується при збільшенні часового інтервалу понад 15 мс;
- збільшення рівня інтенсивності маскуючого звуку на 10 дБ викликає зміщення порогу маскуванню на 3 дБ;
- тривалість маскуючого звуку впливає на міру передмаскування, і не впливає на після маскуванню;
- часове маскуванню залежить від частотного співвідношення маскованого і маскуючого звуків, маскуванню проявляється сильніше, коли частоти цих звуків близькі.

ЛЕКЦІЯ 9. ВИСОТА І ТЕМБР ЗВУКУ

Висота звуку – це суб'єктивна характеристика, фізичним корелятором якої є частота. Поняття "висота" використовується тільки для чистих тонів і періодичних звуків, причому у останніх висота визначається частотою основного тону. Висота може в деякій мірі змінюватися в залежності від гучності звуку, його спектрального складу і тривалості.

Музичний лад. У музиці система звуків, впорядкованих за висотною ознакою, називається **звукорядом** або **музичним ладом**. Існують два види музичних ладів: слуховий відбір (лад, народний) і теоретичний лад (розрахунковий). Другий є загальновизнаним і використовується для налаштування музичних інструментів. У основі цього ладу лежить особливість: при будь-якому абсолютному значенні частоти звуку f однакові відносні зміни частоти створюють відчуття однакового приросту висоти.

Наприклад, зміна частоти з 132 до 264 Гц і з 524 до 1048 Гц сприймається на слух як збільшення висоти тону на одну і ту ж величину або на один і той же висотний інтервал – октаву. **Октава** – одиниця висоти тону. В октаві частоти співвідносяться $f_g / f_n = 2:1$.

Октавою в музиці називається різниця по висоті між двома тонами, при якій вони сприймаються як тотожні. Октава є основним інтервалом, що визначає періодичність музичного ладу. Окрім октавного розбиття музичний лад розбивається на 3 регістри: низький, середній і високий. Октава складається з 12 напівтонів.

Для напівоктави: $f_g / f_n = \sqrt{2}$. Для напівтону: $f_g / f_n = \sqrt[12]{2}$.

У електроакустиці і аудіотехніці в основному використовуються октавні і третиннооктавні шкали частот. Це дозволяє відразу по графіках АЧХ визначати крутизну зрізу фільтрів в дБ/октаву.

Якщо задано число октав n , то

$$f_g / f_n = 2^n .$$

Частотний інтервал в октавах

$$n = 3,33 \lg f_g / f_n.$$

Таким чином, сприйняття висоти тону пропорційне логарифму зміни частоти звуку.

Дослідження показали, що область придатності логарифмічного закону обмежена третьою октавою (1048 Гц). Тому розрізняють два види октав: *гармонічну* (точно по формулах) і *мелодійну*, коли октава визначається на слух.

Гармонічна висота тону. Вимірюється в Гц і гармонічних октавах. За нуль октав прийнята частота ноти до малої октави, частота якої 131 Гц.

Мелодійна висота тону. Вимірюється в мелах і мелодічних октавах.

До частоти 500 Гц мелодійні октави не відрізняються від гармонічних. Понад 500 Гц мелодійна октава не дорівнює відношенню частот 1:2 і у верхній частині діапазону складає 1:10. Тому в якості суб'єктивної одиниці висоти тону була прийнята величина *мел*. При цьому вважають, що частоті 315 Гц відповідає 315 мел. Залежність між цими величинами лінійна приблизно до 2000 Гц (рис. 9.1). Далі ця залежність стає різко нелінійною. Висота тону в мел не перевищує 3000. За нуль мелодічних октав прийнята висота тона 131 мел.

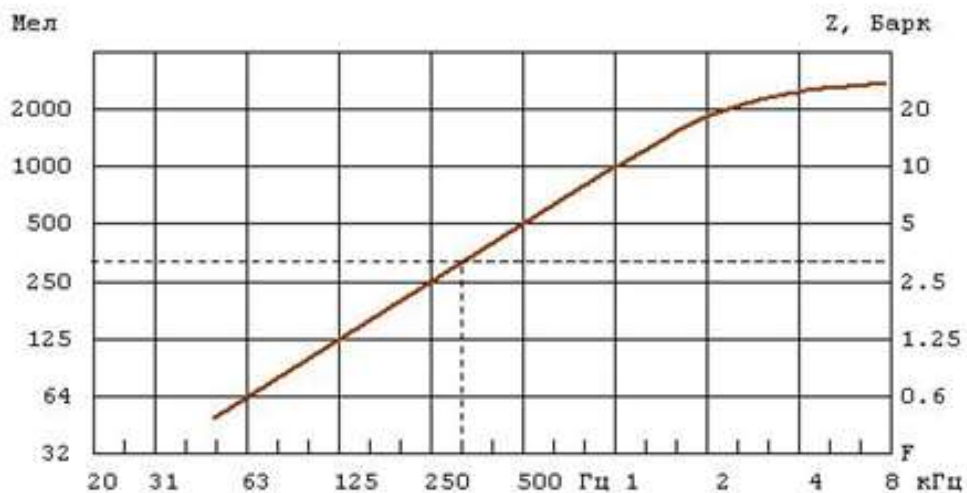


Рис. 9.1. Залежність висоти тону в мелах від частоти

Висота тону у барках. Висоту тону можна також визначати шляхом вимірювання порогу чутності при маскуванні по частотних групах. Збільшення

будь-якої частоти на частотну групу призводить до зростання висоти тону на 1 барк чи 100 мел. Графік на рис. 9.1 можна використовувати для переходу від частотної шкали висоти тону в Гц до шкали висоти тону звуку у барках.

Висота голосу людини залежить від довжини голосових зв'язок. Чим коротші голосові зв'язки і чим вище частота їх коливань, тим вищий голос. Коливання голосових зв'язок співаків можуть створювати звуки в діапазоні від 80 до 1400 Гц. В книзі рекордів Гіннеса зафіксовано найнижчий голос частотою 44 Гц і найвищий – 2350 Гц.

Для того щоб голос не звучав монотонно, він повинен охоплювати принаймні октаву. Деякі красномовні оратори охоплюють голосом дві і навіть три октави у своєму діапазоні. Високий голос, як правило, неприємний для слуху. Його також важко записати без спотворення. Низькі голоси приємні для слуху. Матеріал, який бажаєте донести до слухача можна зробити більш цікавим, зрозумілим і виразним завдяки зміні висоти голосу. Свідомо понизити висоту голосу на цілу октаву, можна, переміщуючи резонанс з носової порожнини в грудну клітку. Якщо людина відчуває напруженість, то висота голосу підвищується. Якщо сердиться – голос стає різким і пронизливим. Якщо втомилася – голос стає хриплим. Якщо засмучена – то і діапазон, і висота голосу знижуються.

Тембр звуку

Тембром звуку називається його особливе забарвлення, що дозволяє відрізнити цей звук від інших звуків такої ж висоти і гучності. Дослівний переклад означає "якість тону", "забарвлення тону". Тембр – це найбільш складна в плані суб'єктивного сприйняття характеристика звуку. На тембр впливають наступні чинники:

1. **Спектр звуку.** Музичні звуки є періодичними коливаннями, спектр яких дискретний і містить окрім основного тону ряд обертонів.

Обертон – усі тони, крім основного, що створюються джерелом звуку внаслідок коливань його частин (наприклад, частини струни, частини стовпа

повітря тощо). Якщо частоти обертонів у ціле число разів більші від частоти основного тону, то їх називають гармонічними обертонами (гармоніками).

Кількість обертонів, їх розміщення по шкалі частот і співвідношення їх амплітуд є найбільш важливим чинником, що визначає тембр звуку.

Наприклад, флейта містить в спектрі усі парні і непарні гармоніки. При цьому рівень (амплітуда) гармонік швидко зменшується з частотою. У кларнета в спектрі, в основному, містяться непарні гармоніки. У труби в спектрі багато високочастотних гармонік. Відповідно, тембри звучання у усіх цих інструментів абсолютно різні: у флейти – м'який, ніжний, у кларнета – матовий, глухий, у труби – яскравий.

Встановлено, що обертони вище восьми не покращують тембр. Перенавантаження обертонами створює відчуття тяжкості звучання. Збідненість складу обертонів призводить до безбарвності тембру.

2. Гучність звуку. При збільшенні амплітуди коливань вібраторів різних музичних інструментів (струн, мембран, дек та ін.) починають проявлятися нелінійні ефекти, і це призводить до збагачення спектру додатковими обертонами.

Зі збільшенням рівня гучності змінюється чутливість слухової системи до сприйняття низьких і високих частот. Тому при підвищенні гучності (до 90...92 дБ) тембр стає повніше, багатіше, ніж при тихих звуках. При подальшому збільшенні гучності починають виникати сильні спотворення в джерелах звуку і слуховій системі, що призводить до погіршення тембру.

3. Часові чинники. Тембр залежить від тривалості наростання і згасання звуку. При цьому обертони і основний тон можуть мати різні тривалості наростання і загасання. Звук фортепіано характеризується короткою тривалістю наростання і тривалим загасанням, тоді як для органу навпаки. Тому тембри цих інструментів абсолютно різні.

4. Вібрато. Дуже істотно на тембр впливає вібрато. Цим терміном позначається невелика амплітудна або частотна модуляція основного тону звуку або його обертонів, що відбувається з частотою не вище 10...12 Гц. Найчастіше така

модуляція здійснюється механічним способом, наприклад, коливаннями пальця, що притискує струну.

5. **Співзвуччя.** Цікаві особливості тембру виникають при одночасному відтворенні цілої групи звуків. Наприклад, унісонне звучання – одночасне відтворення декількома музичними інструментами звуків однієї висоти. В цьому випадку ніколи немає повної тотожності звуків усіх інструментів. Це пов'язано з наступними чинниками:

- не можна відтворити звук однієї і тієї ж висоти з абсолютною точністю, в результаті має місце розкид по частоті, тобто відтворюється не одна частота, а вузька група дискретних частот;
- не можна здійснити повну синхронність наростання звуку і його загасання, тому виникає часова зона звучання;
- музичні інструменти не ідентичні і вони мають істотні відмінності по тембру.

ЛЕКЦІЯ 10. БІНАУРАЛЬНИЙ СЛУХ

Бінауральний слух – це ефект прослуховування двома вухами. Приймальна акустична система у вигляді двох рознесених у просторі приймачів звуку (вух) дозволяє визначати напрям приходу звукової хвилі, тобто локалізувати положення джерела звуку в просторі, а також оцінювати його переміщення.

Інформація, яка поступає на обидва слухові канали, обробляється в периферичній частині слухової системи (піддається спектрально-часовому аналізу) і потім передається у вищі відділи головного мозку, де шляхом порівняння цієї інформації з двох різних каналів формується єдиний просторовий слуховий образ.

Основні властивості бінаурального слуху:

- просторова локалізація;
- ефект передування;
- бінауральне сумування гучності;
- бінауральне демаскування.

Просторове рознесення двох слухових приймачів (вушних раковин), і екрануючий вплив голови і торсу за рахунок дифракційних ефектів призводить до значних відмінностей між сигналами, що надходять в праве і ліве вухо. Це обумовлює три способи локалізації джерела звуку:

1. Часовий – ґрунтується на визначенні різниці фаз сигналів, що надходять до лівого і правого вуха.

Працює переважно на низьких частотах (що не перевищують 800 Гц). Низькочастотні сигнали мають довжину хвилі більше, ніж діаметр голови слухача, тому вони огинають голову і не дають акустичній тіні. Різниця часу Δt надходження однакових фаз звуку до різних вух визначається рівністю

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{c_0},$$

де Δx – різниця ходу звукової хвилі до лівого і правого вуха (рис. 10.1), c_0 – швидкість поширення звуку в повітрі (340 м/с).



Рис. 10.1. Механізм виникнення різниці ходу звукової хвилі

У свою чергу Δx залежить від розмірів голови людини, точніше від відстані між вухами, яка в середньому дорівнює 18 см. Максимальна різниця ходу d становить 23 см при розташуванні джерела під кутом 90 градусів (збоку). При такій різниці ходу максимальний час затримки дорівнює 0,63 мс.

Синус кута локалізації пропорційний часовій різниці надходження двох сигналів на різні вуха:

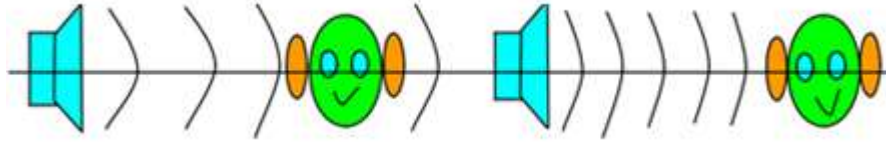
$$\sin \alpha \approx \frac{c_0 \Delta t}{d}.$$

На високих частотах час затримки становить більше половини періоду коливання, тому поняття фази втрачає сенс.

2. **Амплітудний** – ґрунтується на визначенні різниці рівнів сигналів, що надходять до лівого і правого вуха. Різниця виникає із-за різних звукових тисків звуку в лівому і правому вусі внаслідок дифракції звукової хвилі.

Високочастотні звуки мають довжину хвилі менше, ніж діаметр голови слухача, тому вони не проходять до лівого вуха. Внаслідок дифракції звукової

хвилі навколо голови слухача і частотно-залежного загасання цієї хвилі з відстанню, звуки до правого і лівого вух слухача приходять не однаковими. Виникає зона акустичної тіні (рис. 10.2).



10.2. Механізм утворення акустичної тіні

$$\sin \alpha \approx B \Delta L;$$

$$\Delta L = 20 \lg \frac{P_1}{P_2},$$

де B – стала Стюарта (табл. 10.1); P_1 – тиск звукової хвилі у вусі, яким ми чуємо; $P_1 > P_2$.

Таблиця 10.1. Значення сталої Стюарта для вибраних частот

f , Гц	250	500	1000
B	2,9 ⁰	4,6 ⁰	6,9 ⁰

На частотах, нижче 300 Гц, бінауральний ефект практично відсутній і вухо не фіксує напрям звуку. На частотах менше 150 Гц локалізація відсутня взагалі. Це означає, що не важливо, де розміщувати низькочастотні акустичні системи при стереовідтворенні звуку.

На частотах від 300 до 1000 Гц стає помітним зсув фаз звукових хвиль, що надходять в праве і ліве вухо. Мозок миттєво обчислює, якому напрямку може відповідати ця різниця, і таким чином визначає, звідки йде звук. На частотах більше 1000 Гц зсув фаз стає дуже невеликим (довжина хвилі зменшується) і визначення напрямку здійснюється за рахунок порівняння сили звуку, що приходить з різних сторін.

Чисті тони високих частот (понад 8 кГц) майже не піддаються локалізації.

3. **Спектральний** – ґрунтується на різниці спектрів сигналів, що надходять до лівого і правого вуха. Різниця в спектральному складі звуків, що сприймаються

лівим і правим вухом, виникає внаслідок неоднакового екрануючого впливу голови і вушних раковин на низькочастотні і високочастотні складові спектру складного звуку.

При сприйнятті складних звуків і звукових імпульсів досягається найбільша точність локалізації. При цьому важливим чинником є спектральний склад звуків. Так, якщо звук містить низькочастотні і високочастотні складові і діє під кутом 90^0 на праве вухо, то в лівому вусі високочастотних складових не буде, оскільки голова буде слугувати екраном. При цьому низькочастотні сигнали огинають голову і доходять до лівого вуха, тобто будуть присутні в спектрі.

Точність локалізації – це точність, з якою можна визначити напрямок на джерело звуку. Найменший відчутний кут сприйняття відхилення джерела звукових імпульсів називають **бінауральною роздільною здатністю слуху**. У звичайних умовах слух здатний визначати кутове переміщення джерела звуку в горизонтальній площині з точністю близько $3^0...4^0$. При нерухомому джерелі звуку слух здатний визначити напрям на нього не точніше 12^0 , а по вертикалі – $17^0...20^0$.

Тональні сигнали частотою від 800 Гц до 4 кГц мають точність локалізації порядку 20^0 .

Якщо ми знаходимося спиною до джерела, розміщеного в горизонтальній площині, точність локалізації складає приблизно 20^0 .

Якщо джерело в вертикальній площині і ми розміщені спиною до джерела – точність локалізації дорівнює 45^0 .

Точність локалізації джерела, що рухається – це точність визначення кута переміщення джерела, тобто мінімальний кут переміщення, який можливо зафіксувати. Точна локалізація становить 3^0 .

При локалізації джерел звуку параметри ΔL і Δt повністю взаємозамінні (можна одну величину перерахувати в іншу, використовуючи коефіцієнт еквівалентності).

Величини Δt і ΔL є не лише лінійними функціями кута, а залежать також від частоти. Вони змінюються при переході від однієї частотної групи слуху до іншої, залишаючись приблизно постійними в межах однієї частотної групи.

На низьких частотах (нижче 500 Гц) більшу роль відіграє часовий чинник. У діапазоні середніх частот (від 500 до 5000 Гц) обидва ці чинники приблизно в рівній мірі сприяють створення відчуття напрямку. Таким чином, при оцінці розміщення джерела звуку голова і вушні раковини виконують функцію просторового фільтру. Судження про величину кутового зміщення джерела звуку від медіанної площини пов'язане з оцінкою слуховою системою часових та інтенсивнісних відмінностей пари бінауральних звуків.

Локалізація джерел звуку у вертикальній площині

Здатність визначати напрям приходу звуку у вертикальній площині у людини розвинена дуже слабо і розподільна здатність складає всього 10...15 градусів. Ця здатність пов'язана з орієнтацією і формою вух.

Механізм сприйняття звуку в площині фронт-тил. Коли одне джерело випромінювання (ΓA або ΓB) розташоване у фронтальній або тильовій площині під кутом φ , тоді відстані поширення звуку до вух різні (r_1 і r_2). У цій ситуації у визначенні локалізації приймають участь обидва параметри ΔL і Δt (рис. 10.3).

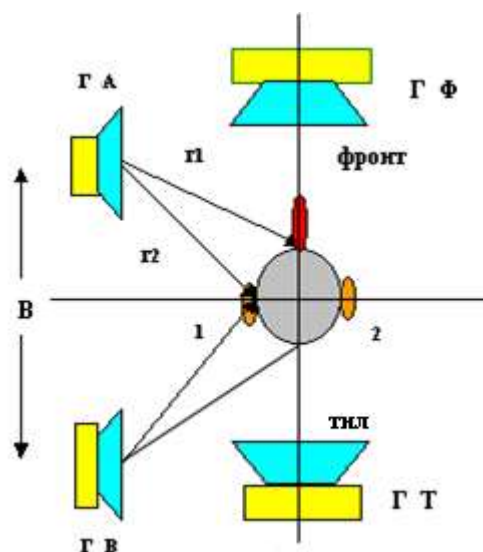


Рис. 10.3. Механізм сприйняття звуку в площині фронт-тил

Якщо джерело звуку розташоване в медіанній площині (Г Ф або Г Т), тоді значення ΔL і Δt для них практично однакові ($r_1 = r_2$) і неможливо оцінити кут ϕ джерела звуку відносно медіанної площини (рис. 10.3). Незважаючи на це, локалізація може бути безпомилковою, якщо здійснити додатковий спектральний аналіз бінауральної пари звуків.

Локалізація джерел звуку по глибині

Одночасно з визначенням напрямку на джерело звуку слухач упевнено оцінює відстань до джерела звуку.

1. При середніх відстанях до джерела звуку 3...15 м наближення і віддалення джерела звуку супроводжується зміною його інтенсивності. У вільному звуковому полі на НЧ збільшення відстані удвічі супроводжується зменшенням рівня звукового тиску на 6 дБ. На слух відстань завжди визначається менше, ніж вона є. Помилка збільшується зі збільшенням відстані.

2. На близьких відстанях менше 3 м на глибинну локалізацію впливає дифракція на вушній раковині і голові, тобто позначається різниця інтенсивності і часові затримки. Точність глибинної локалізації при зміщенні широкосмугового джерела від 50 до 150 см не перевищує 15-30%.

3. На великих відстанях (понад 15 м) починають позначатися загасання, що залежать від відстані поширення звукової хвилі. Це супроводжується більш швидким загасанням ВЧ складових, зміною тембру. Поширення звуку залежить від вологості повітря і напрямку вітру. Збільшення амплітуди НЧ складових спектру звуку викликає відчуття наближення джерела звуку. Штучне зменшення ВЧ складових спектру сприймається як віддалення джерела звуку.

4. Глибинна локалізація можлива при моноуральному прослуховуванні, проте, бінауральне сприйняття істотно підвищує точність оцінки відстані. При цьому орган слуху підсвідомо оцінює величини Δt і $L_{\text{сер}} / \Delta L$, де $L_{\text{сер}}$ – середнє значення інтенсивностей звуків, що діють на ліве і праве вухо. При відстанях більше 10 м ці чинники не працюють.

ЛЕКЦІЯ 11. БІНАУРАЛЬНЕ СУМУВАННЯ ГУЧНОСТІ. ЕФЕКТИ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА ПЕРЕДУВАННЯ. БІНАУРАЛЬНЕ МАСКУВАННЯ І ДЕМАСКУВАННЯ

Рівень слухових порогів при бінауральному сприйнятті сигналів нижчий, ніж при моноуральному. Інтенсивність звуку при якій досягається поріг чутності при сприйнятті сигналу двома слуховими приймачами нижче на 3 дБ. Це означає, що для того, щоб моноурально (одним вухом) почути сигнал, який знаходиться на порозі чутності при бінауральному прослуховуванні потрібно акустичну потужність збільшити в два рази. Таким чином, наявність двох слухових приймачів дозволяє почути значно тихіші звуки, що має істотне значення для оцінки навколишнього звукового простору.

Бінауральне сумування гучності проявляється в тому, що сигнал при заданому рівні гучності, наприклад, 70 дБ, звучатиме в два рази голосніше, якщо він подається на два вуха, ніж на одне, тобто гучність подвоюється (сумується).

Криві залежності гучності від рівня сигналу, побудовані на різних частотах, показали, що зі збільшенням рівня сигналу все більше проявляються переваги бінаурального слуху.

Зокрема, якщо рівень сигналу нижче 35 дБ, то для того, щоб звуки були рівногучними при моно- і бінауральному прослуховуванні, сигнал, що подається на обидва вуха, може бути на 3 дБ нижче по інтенсивності. При рівні вище 35 дБ ця різниця збільшується, і залишається приблизно постійною при подальшому збільшенні рівня сигналу.

Диференціальна чутливість (тобто здатність розрізняти відмінності в звуках по частоті або по інтенсивності) при бінауральному прослуховуванні вище по інтенсивності в 1,65 рази, а по частоті – в 1,44 рази ніж при моноуральному.

Таким чином, наявність двох слухових приймачів дозволяє почути тоншу відмінність звуків по висоті і по гучності, що має принципово важливе значення як для аудіотехніки, так і для сприйняття музики.

Ефект інтегральної локалізації

На рис. 11.1 показані два джерела звуку 1 і 2, розташовані на відстані $2l$ один від одного. На відстані x від бази гучномовців на осі симетрії розташований слухач, вуха якого знаходяться на відстані r_1 і r_2 від джерел звуку.

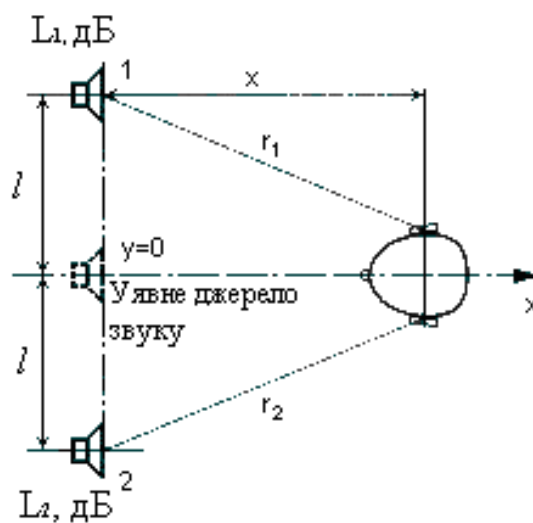


Рис. 11.1. Механізм виникнення ефекту інтегральної локалізації

Якщо на обидва гучномовці подати однаковий сигнал, то звук від гучномовця 1 досягатиме правого вуха за час τ_1 , а від гучномовця 2 – лівого вуха за час τ_2 , причому $\tau_1 = \tau_2$. Ідентичність звуків не дозволить слуху розділити їх в просторі. Так створюється слухова ілюзія: нібито уявне джерело звуку знаходиться посередині бази – між гучномовцями 1 і 2. Якщо зменшити гучність першого гучномовця, тобто $L_1 < L_2$, то це буде сприйнято слуховою системою як переміщення уявного джерела звуку вбік більш гучного джерела 2 і навпаки. Таким чином, змінюючи гучність звучання лівого і правого джерела, можна створити і підтримувати ілюзію переміщення уявного джерела звуку. Це явище називають **інтегральною локалізацією** (чи сумаційним ефектом).

Аналогічну ілюзію переміщення уявного джерела звуку можна отримати, створюючи часові затримки звуку в одному з джерел. При цьому віртуальне джерело звуку переміщається у бік гучномовця, випромінюючого звук з випередженням.

Якщо часова затримка $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 > 1,1$ мс, сумарний ефект зникає і слухач буде по черзі чути і перше, і друге джерело.

На рис. 11.2 показані залежності локалізації уявного джерела звуку відповідно від різниці рівнів і часової затримки сигналів в каналах. Обидва ці ефекти широко використовуються при записі музики.

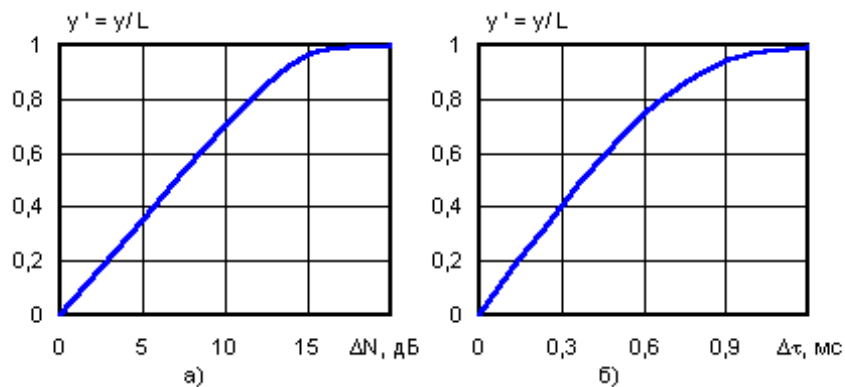


Рис. 11.2. Залежність локалізації:

а) від різних рівнів звукової енергії сигналів в каналах; б) від часового зсуву сигналів в каналах

При однакових рівнях основного і затриманого сигналів віртуальне джерело звуку відчувається на місці фізично існуючого джерела, випромінюючого випереджаючий сигнал. Джерело звуку, що випромінює затриманий сигнал, не відчувається зовсім, але його присутність проявляється у вигляді підвищення загальної гулкості звучання. При затримці одного з сигналів на час $\Delta\tau > 50$ мс наявність сигналу, що запізнюється, відчувається як перешкода у вигляді луни, хоча положення уявного джерела звуку залишається незмінним. Це означає, що випереджаючий сигнал при однаковому рівні із затриманим повністю його маскує.

Підвищуючи рівень сигналу, що запізнюється, можна досягти того, що обидва джерела звуку будуть сприйматися окремо навіть якщо $\Delta\tau < 50$ мс.

На рис. 11.3 показана залежність необхідного перевищення рівня сигналу, що подається з часовою затримкою, від величини цієї затримки.

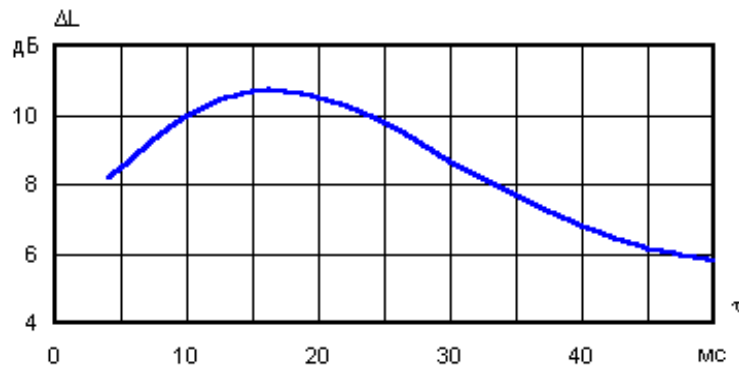


Рис. 11.3. Вплив сигналу, що подається із затримкою на локалізацію віртуального джерела звуку

При $\Delta\tau = 15...20$ мс рівень затриманого сигналу має бути підвищений на 11 дБ, щоб обидва джерела звуку сприймалися окремо. При $\Delta\tau \approx 50$ мс для цього ефекту достатнє перевищення рівня всього на 6 дБ. При $\Delta\tau = 65$ мс сигнал, що запізнюється, відчувається як луна. При $\Delta\tau < 5$ мс спостерігається нестійкий режим: віртуальне джерело звуку нібито перестрибує з одного джерела звуку в інше, співпадаючи то з джерелом випереджаючого звуку, то з джерелом звуку, що випромінюється з часовою затримкою.

Якщо джерела звуку різко розрізняються по тембру, це може привести до роздільного відчуття двох звукових об'єктів навіть при рівних рівнях інтенсивності обох сигналів.

Ефект передування (ефект Хааса)

У приміщенні слухач сприймає не лише прямий звук від джерела сигналу (співака, музиканта, лектора та ін.), а й відбиті звуки від стін приміщення. Відбиті звуки надходять у вуха пізніше і мають напрям, що відрізняється від напрямку прямого звуку. Джерело звуку в цьому випадку локалізується по

напрямку прямого звуку, а не відбитого. На глибинну локалізацію в даному випадку значно впливає ефект передування.

Ефект передування полягає в тому, що в межах певного відрізка часу звуковий сигнал, що надійшов раніше, домінує в слуховому сприйнятті над звуками, що надійшли пізніше (луна) і слухова система відділяє прямий звук від його ревербераційних продовжень. Ефект передування значно залежить від співвідношення інтенсивностей сигналів, від міри їх подібності та їх спектрального складу і має велике значення при оцінці акустики приміщення.

Висновок про напрям знаходження джерела звуку формується на основі прямих звуків, в той час як частина звуків, що слідують за ними через інтервал від 1..5 мс до 30...50 мс пригнічується слуховою системою. В свою чергу, відбиті звуки надають забарвлення звуку, що сприймається слухачем. Вони несуть інформацію про просторовість, інтимність, ясність та інші суб'єктивні параметри, що відіграють вирішальну роль в оцінці якості звучання в приміщеннях. Відбиті звуки мають важливе значення для визначення розбірливості мови в приміщеннях.

При більших затримках пригнічення не відбувається і тоді відбиті сигнали можуть сприйматися як окремі сигнали, що повторюються, – луна. Рівень їх усвідомленого сприйняття залежить від часу затримки, співвідношення інтенсивностей прямого і відбитого звуку, спектрального складу сигналу, міри заповнення паузи між надходженням відбитих сигналів та ін. Наявність луни в приміщенні негативно впливає на якість звучання музики і розбірливість мови.

Ефект передування є динамічним, тобто вимагає певного часу для "навчання" слухової системи. Якщо в заглушеній камері встановити два гучномовці і подати на них один за одним два короткі імпульси, то спочатку слухач сприймає їх як окремі клацання. Через певний час другий імпульс слабшає і стає чутний тільки один імпульс від першого гучномовця, а другий лише додає деяку об'ємність. Цікаво, що якщо зробити невелику паузу і повторити експеримент, то слухач відразу чує звуковий образ від першого

гучномовця. Існує припущення, що слухова система за період "навчання" буде певну модель акустичного простору, створюючи таким чином основу для відділення прямих звуків від відбитих. Завдання створення моделі (образу) акустичного простору виконується вищими відділами нервової системи.

Бінауральне маскування і демаскування

Коли маскуючий і маскований звуки надходять в різні вуха то має місце **бінауральне маскування**. Зміщення порогу чутності при бінауральному маскуванні завжди значно менше, ніж при моноуральному маскуванні і найбільше проявляється на високих частотах.

Бінауральне маскування виникає тільки за умови, якщо час дії маскуючого звуку не менше 250 мс. Найбільш виражений ефект маскування спостерігається, коли маскований і маскуючий звук близькі по частоті. При цьому, на відміну від моноурального маскування, відсутні биття і маскування виражене в дуже вузькій смузі частот, що співпадає з шириною критичних смуг слуху (рис. 11.4).

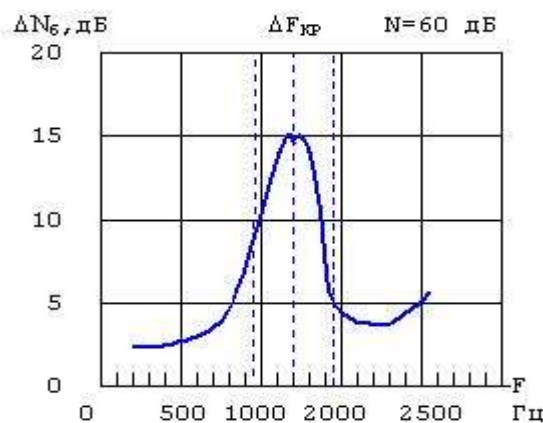


Рис. 11.4. Бінауральне маскування

Міра бінаурального маскування зростає, коли обидва звуки мають пульсуючий характер, що характерно для мови і музики.

Бінауральним демаскуванням називають зниження порогу маскування при виділенні окремих звуків з одночасно діючої сукупності. Це досягається

шляхом додаткової обробки вхідної інформації як в периферійному, так і центральному відділах слухової системи і мозку.

Наприклад, якщо в стереотелефони подати одночасно один і той же шум, і один і той же маскований звук, то окрім шуму нічого не почуємо.

Якщо ж маскований звук подати тільки в одне вухо, то ми його почуємо, і його рівень суб'єктивно підвищується. При цьому шум і звук локалізуються в різних місцях голови. Шум в середині голови, а звук ближче до вуха, на яке він подається. Таким чином, демаскування здійснюється із-за різної суб'єктивної локалізації шуму і звуку.

Аналогічне явище відбувається при тихій розмові в шумній аудиторії, наприклад, на дискотеці. Людина мимоволі повертає голову і знаходить положення, при якому в обидва вуха поступає однаковий шум, який сприймається в середині голови. Звук розмови локалізується у іншому місці ближче до вуха і він добре чутний. Цей механізм працює тільки за наявності в спектрі звуку НЧ складових.

Бінауральне демаскування передбачає використання слуховою системою часових і інтенсивністних відмінностей пар бінауральних звуків, що відповідають окремим джерелам, для їх розділення один від одного.

ЛЕКЦІЯ 12. СЛУХОВЕ СПРИЙНЯТТЯ ПРОСТОРОВИХ СИСТЕМ

При локалізації звуків від різних, одночасно працюючих джерел в реальному приміщенні (наприклад, в системах домашнього кінотеатру) слуховій системі в процесі локалізації, тобто в процесі побудови просторового образу, доводиться вирішувати відразу дві різні і важкі задачі:

1. Класифікувати усі звуки, що надійшли, за потоками, визначити до якого джерела який звук належить;
2. Виконати локалізацію усіх джерел, для чого необхідно встановити, які звуки є прямими (йдуть прямо від джерел), а які є відбитими сигналами (луна), і тому їх можна не приймати до уваги при локалізації.

При одночасному прослуховуванні звуків від різних джерел слухова система спочатку групує їх по потоках (визначає, які звуки до якого джерела належать), використовуючи при цьому різні непросторові ознаки (значення основної частоти, міру гармонійності, амплітудну обвідну, структуру перехідних процесів і ін.), а потім локалізує це джерело звуку. Після цього слух продовжує розділяти звуки, що послідовно поступають, по потоках, але при цьому вже використовує просторові ознаки (різницю в часі вступу кожного джерела, різницю по амплітуді в різних вухах та ін.).

На точність локалізації декількох джерел значно впливають відбиті звуки, що виникають у будь-якому приміщенні прослуховування (студії, концертному залі, кімнаті). Структура відбитих сигналів в приміщенні має вигляд, представлений на рис. 12.1.

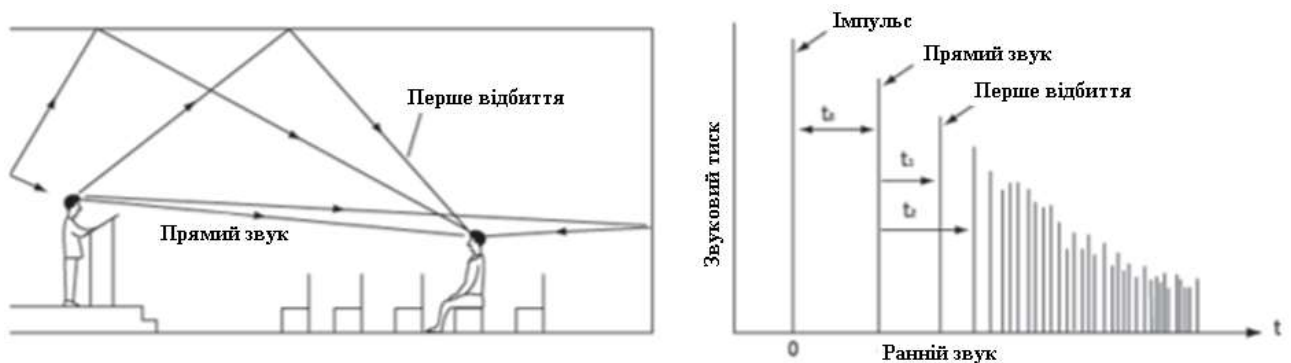


Рис. 12.1. Розповсюдження звуку в приміщенні

Якщо джерело звуку випромінює короткий імпульс, то до слухача (чи мікрофону), що знаходиться у визначеному місці приміщення, спочатку надходить прямий сигнал, потім, через певні відрізки часу, перші відбиті сигнали (як правило, від стелі, бічних стін, підлоги), потім кількість цих відбитих сигналів зростає, і процес спаду рівня сигналу стає майже безперервним.

Час, впродовж якого сигнал спадає на 60 дБ, називається ***часом стандартної реверберації***.

Процес реверберації визначає якість тембру звуку в приміщенні, крім того, він істотно впливає на процес локалізації джерел. Відбиті звуки, що надходять з усіх напрямів значно погіршують точність.

Особливо "страждає" від цього така ознака локалізації, як різниця в часі між сигналами на двох вухах. У приміщенні, де відбиті звуки переважають над прямими, цей критерій локалізації взагалі стає ненадійним. Проте другий критерій – різниця по інтенсивності "страждає" менше, оскільки він використовується на високих частотах, де коефіцієнт поглинання значно зростає з частотою, і рівень відбитих сигналів зменшується. Якщо локалізуються широкосмугові сигнали від різних джерел в приміщенні, що сильно реверберує, то слухова система, в основному, покладається на інформацію від високочастотної частини спектру, використовуючи тільки другий критерій. Така переоцінка локалізаційних ознак відбувається на підсвідомому рівні.

Тембр звуку при просторовому звукосприйнятті

Просторове звукосприйняття базується на створенні слухових ілюзій. Коли два або більше джерел генерують звук з різних точок приміщення, слухач чує звуки, що виходять з неіснуючих (уявних) джерел, сприймаючи певну звукову панораму. Слід зазначити, що слухачі по-різному оцінюють тембр звуку, що надходить від уявного і реального джерела.

Для оцінки тембру використовується розподіл спектральних рівнів усередині третиннооктавних смуг. Розподіл третиннооктавних смуг дуже близький до частотно-залежної ширини критичних смуг слуху. Бінауральні ефекти при сприйнятті тембрів залежать від суми спектральної питомої гучності, що надходить з кожного вушного каналу в центральні відділи слухової системи.

Для виконання порівняльної оцінки тембрів віртуальних і реальних джерел на першому етапі визначали положення віртуального джерела для заданої конфігурації гучномовців за допомогою розрахункових формул і, використовуючи комп'ютерне моделювання слухової системи, проводили розрахунок спектру звукового сигналу у вушному каналі в кожній критичній смузі (аналогічно визначенню середньої гучності).

На другому етапі експерименту в цю ж позицію поміщали реальне джерело. Для нього також проводили аналогічний розрахунок і додаткові вимірювання спектру реального звуку в слуховому каналі. Після цього із спектру уявного джерела віднімали спектр реального джерела, і по отриманій різниці оцінювали різницю спектрів і, відповідно, різницю в тембрах. Результати, отримані для двох гучномовців в стереопарі в заглушеній камері, наведені на рис. 12.2.

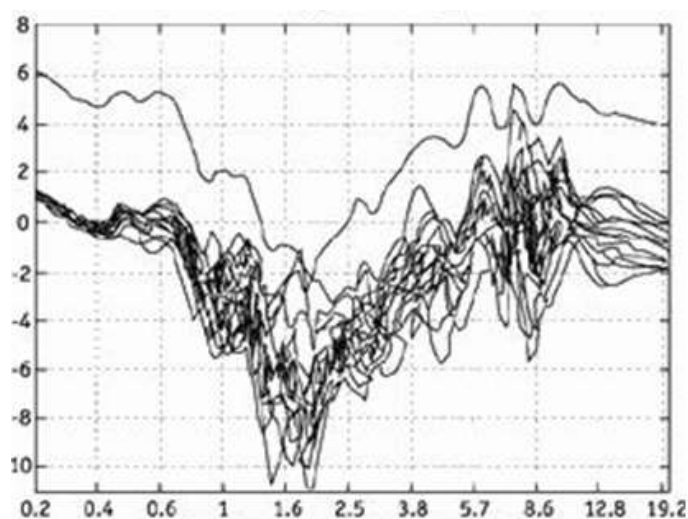


Рис. 12.2. Різниця спектральних рівнів гучності реального і уявного джерела

На графіку показана різниця між сумарними сигналами, що надходять в кожне вухо. Вони були виміряні у двадцяти різних слухачів від уявного джерела, а також реального джерела, поміщеного на визначене розрахунковим шляхом місце уявного джерела. По осі абсцис відкладені центральні частоти для кожної критичної смуги, по осі ординат – рівень гучності у фонах.

Як видно з рис. 12.2, різниця спектральних рівнів гучності реального і уявного джерела дуже значна в області 2 кГц (є широкий провал більше 10 фон), також спостерігаються істотні відмінності і в області високих частот: на частоті 8 кГц – більше 4 дБ.

Ця різниця з'являється за рахунок ефекту "гребінчастої фільтрації", яка виникає при складанні когерентних (однакових) сигналів від двох (чи декількох) гучномовців на кожному слуховому каналі. Цей ефект проявляється при визначенні положення уявного джерела, і відсутній, коли звук йде від одного гучномовця, що знаходиться в цьому ж місці.

Аналогічні експерименти і розрахунки були проведені в приміщенні з реверберацією і в звичайній кімнаті. Час реверберації було обрано $0,3 \pm 0,05$ с, а гучномовці розміщувалися в горизонтальній площині під кутом 30° на відстані 2 м. При розрахунках різниці в спектрах реального і уявного джерел на моделі слухової системи враховувалися бінауральні імпульсні характеристики приміщення, результати показані на рис. 12.3.

Видно, що наявність в кімнаті відбитих сигналів зменшує ефект гребінчастої фільтрації, а також зменшує різницю між спектрами реальних і уявних джерел. Проте вона все одно досить велика в області середніх частот. Якщо подавити прямий сигнал і перші відображення на проміжку 50 мс, тобто залишити тільки дифузний відрізок реверберації, то видно, що ніякої різниці (і, відповідно, зміни тембру) практично немає, оскільки в дифузному полі ефект гребінчастої фільтрації відсутній.

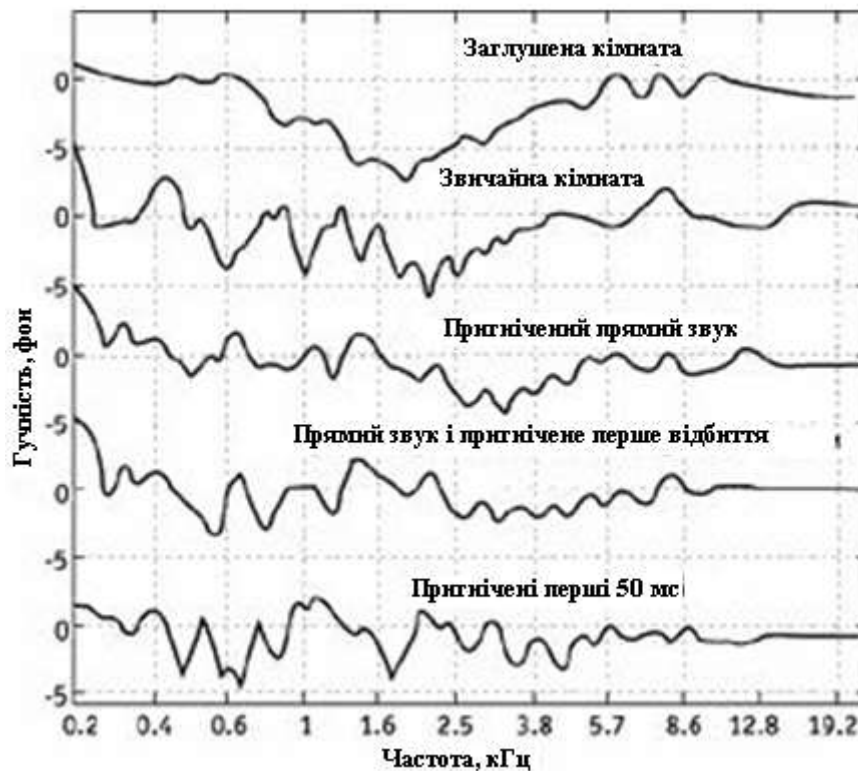


Рис. 12.3. Різниця спектральних рівнів гучності реального і уявного джерела в заглушеній камері і реальному приміщенні при пригніченні перших відбитих звуків

Проведені експерименти дозволили зробити ряд важливих висновків:

1. Формування тембру віртуального джерела при різному положенні гучномовців відбувається за рахунок двох ефектів: гребінчастої фільтрації і впливу ревербераційних процесів в приміщенні.

Звукові хвилі від декількох гучномовців надходять до вушних каналів в різний час, що служить обумовлює існування інтерференційних ефектів типу "гребінчастого фільтру" при сприйнятті уявного джерела. При стерео розміщенні гучномовців цей ефект створює глибокі провали в області 1...4 кГц в спектрі сигналів, що надходять на вушні канали.

Ці провали призводять до істотних відмінностей при сприйнятті тембру і гучності віртуального і реального джерел, особливо при прослуховуванні в заглушеній камері або сильно заглушеному приміщенні.

2. При збільшенні заглушення приміщення, тобто при сильному зменшенні часу реверберації, різниця у сприйнятті тембрів збільшується.

3. Даний ефект сильніше проявляється, коли гучномовці знаходяться у фронтальній площині перед слухачем; коли ж вони зміщуються убік або слухач повертає голову, то провали переміщуються у бік високих частот, і стають менш помітними на слух.
4. Коли просторові системи розміщуються в реальному приміщенні, ефект гребінчастої фільтрації проявляється менше – в дифузному полі він взагалі не проявляється, але на сприйняття тембру віртуального джерела починають впливати процеси ранніх відображень і пізньої реверберації в приміщенні.
5. Вимірювання, виконані для двох гучномовців, а також для системи з трьох гучномовців, розміщених трикутником, з використанням різних видів сигналів (шумові, імпульсні та ін.), показали, що загальні закономірності сприйняття тембрів і гучності віртуального джерела зберігаються.

ЛЕКЦІЯ 13. МОДЕЛІ МЕХАНІЧНИХ ТА ГІДРОАКУСТИЧНИХ СТРУКТУР ВУХА ЛЮДИНИ-1

Розробка сучасних приладів для дослідження слуху потребує вдосконалення об'єктивних акустичних методів діагностики. Це особливо актуально для діагностики порушень слуху у дітей, оскільки суб'єктивні методи в силу своїх особливостей не підходять для діагностики слуху в ранньому віці.

Для апаратного отримання достовірної діагностичної інформації потрібно використовувати адекватні моделі механічних та гідроакустичних структур вуха людини.

Модель зовнішнього вуха

Основні функції зовнішнього вуха – надання слуху певної спрямованості, концентрація енергії звукових хвиль і захист барабанної перетинки від шкідливих впливів температури і вологості середовища. На інформаційні процеси моноуральної обробки акустичних сигналів дана частина слухової системи істотно не впливає.

Якщо необхідно врахувати вплив не зовсім рівномірної частотної характеристики зовнішнього вуха, можна скористатися простою апроксимацією його передатної характеристики у вигляді

$$K(p) = \frac{1 + pT_1 + p^2T_0^2}{1 + pT_2 + p^2T_0^2},$$

де $T_0 = 40\text{мс}$, $T_1 = 60\text{мс}$, $T_2 = 15\text{мс}$, а p – комплексна частота.

На рис. 13.1 показана схема електричного кола, що має таку передатну характеристику.

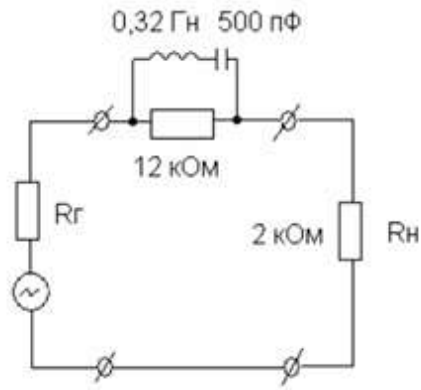


Рис. 13.1. Схема електричного кола, передатна характеристика якої дорівнює частотній характеристиці коефіцієнта передачі зовнішнього вуха

Похибка апроксимації експериментальної частотної характеристики зовнішнього вуха при $R_{\Gamma} = R_H = 2 \text{ кОм}$ не перевищує 2 дБ. При інших значеннях $R_{\Gamma} = R_H$ параметри моделі визначаються по формулах:

$$L = \frac{2R_H}{\pi f_0},$$

$$C = \frac{1}{8\pi f_0 R_H},$$

$$R = 6R_H,$$

де f_0 - частота максимуму ($f_0 = 4 \text{ кГц}$).

Моделі середнього вуха

Основна функція середнього вуха – узгодження опорів повітряного середовища середнього вуха і перилімфи, що заповнює завитку внутрішнього вуха.

1. Математична модель середнього вуха Фролова

Приймаючи за основу анатомічну будову і особливості функціонування середнього вуха, для розрахунку його акустичних характеристик була запропонована схема, представлена на рис. 13.2.

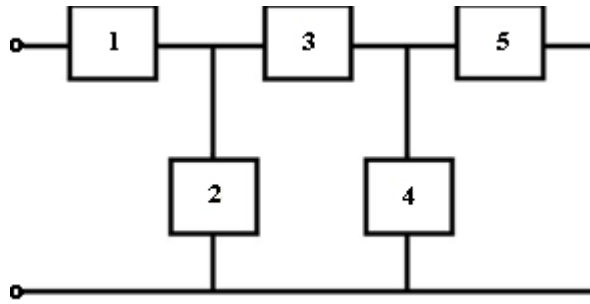


Рис. 13.2. Функціональна схема, що описує роботу середнього вуха

Блок 1 відображає наявність порожнин з повітрям в середньому вусі, оскільки переміщення будь-якої частини барабанної перетинки відбувається через стиснення повітря, яке знаходиться в цих порожнинах. Блок 2 відображає частину барабанної перетинки, яка не взаємодіє із кісточками середнього вуха. Частину барабанної перетинки, яка з'єднана з кісточками середнього вуха, а також молоточок і коваделко можна розглядати як один елемент, що коливається з певною амплітудою та фазою. Їх відображає блок 3. Блок 4 відповідає за те, що не вся акустична енергія передається через коваделко-стремінцевий суглоб. І нарешті, блок 5 – це з'єднання стремінця з овальним вікном – повний опір завитки та віконної мембрани. Тут достатньо одного блока, так як стремінце та віконна мембрана коливаються приблизно з однією амплітудою та фазою.

Електрична модель вуха людини зображена на рис. 13.3.

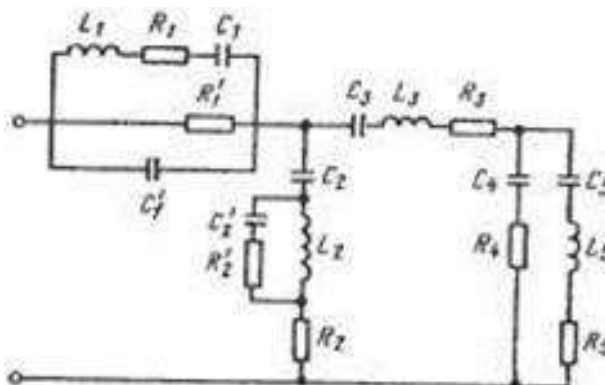


Рис. 13.3. Електрична модель середнього вуха

Елементи з індексом «1» відносяться до порожнин середнього вуха, з індексом «2» – до барабанної перетинки, з індексом «3» – до блоку молоточка, з індексом «4» – до коваделко-стремінцевого суглобу, та з індексом «5» – до комплексу завитки.

Відсутність п'ятого блоку ($C_5=0$; $R_5=0$; $L_5=0$) відповідає вуху з отосклерозом. Якщо при цьому покласти ще $C_4=0$ і $R_4=0$, то матимемо електричну модель середнього вуха, без коваделка (після видалення коваделка в результаті хірургічного втручання все середнє вухо починає працювати по іншому, оскільки усуваються дії коваделко-стремінцевого суглоба, стремінця, завитки, мембрани вікна).

Індуктивність L_1 – аналог акустичної інертності, обумовленої вузьким проходом між барабанною порожниною та іншими порожнинами. Опір R_1 – модель акустичного опору, який виникає у тих самих проходах. Ємність C_1 представляє акустичну проникність об'єму повітря у порожнині та повітряних порожнинах у кістці. Опір R_1' представляє собою поглинання звуку в стінках акустичної порожнини та євстахієвій трубі, але також відповідає за поглинання звуку в порожнині кістки. Ємність C_1' відповідає за акустичну проникність порожнини середнього вуха. Значення $L_1=14$ мГн було обрано таким, щоб нулі реактивного опору моделі приблизно співпадали з нулями кривих реактивних опорів дуже низької частоти. Сума ємностей C_1 та C_1' відповідає загальному об'єму V порожнин середнього вуха, тобто

$$C_1 + C_1' = \frac{V}{\rho c^2} = 5,45 \text{ мФ}.$$

Прийнявши наближене значення для загального об'єму 8 см^3 та середнього об'єму барабанної порожнини $0,5 \text{ см}^3$, отримаємо $C_1=5,1 \text{ мФ}$, а $C_1'=0,35 \text{ мФ}$. Опори R_1 та R_1' знаходять з фазових співвідношень, отриманих шляхом вимірювань повного опору порожнин середнього вуха нормального та патологічного вуха.

Блок молоточка складається з молоточка, зв'язок, які його тримають, м'язів барабанної перетинки та частини барабанної перетинки, які коливаються з однаковою амплітудою та фазою. В цілому цю структуру можна замінити електричною моделлю з послідовних ємності C_3 , опору R_3 та індуктивності L_3 .

На низьких частотах частина барабанної перетинки, яка не приєднана до молоточка, може бути представлена ємністю, яка з'єднана послідовно з опором. На високих частотах, коли працює більша частина барабанної перетинки, до кола повинна бути приєднана також індуктивність. Досліди, що були проведені на двох пацієнтах із видаленим коваделком, дозволили отримати наступні параметри елементів електричної моделі: $C_2=0,23$ мФ, $L_2=15$ мГн, $R_2=40$ Ом, $C_2'=0,4$ мФ, $R_2'=220$ Ом, $C_3=1,4$ мФ, $L_3=40$ мГн, $R_2=70$ Ом.

Елементи блока 4 визначаються, ґрунтуючись на анатомічних особливостях та вимірюванні повного опору барабанної перетинки. Очевидно, що сили пружності та тертя в суглобі між двома кісточками відіграють важливу роль. Найпростіша електрична модель, що відображає даний факт – послідовне з'єднання ємності $C_4=0,25$ мФ та опору $R_4=3000$ Ом. Елементи блоку завитки були обрані так, щоб повний вхідний опір моделі дорівнював середньому значенню повного опору барабанної перетинки. При цьому $C_5=0,6$ мФ та опору $R_5=600$ Ом. Під час експериментальних досліджень було виявлено, що вхідний повний опір настільки не чутливий до L_5 , що цей елемент можна прибрати зі схеми.

Порівняння характеристик активного та реактивного опорів, а також повного опору моделі з типовими даними, отриманими на багаточисленних пацієнтах, вказує на гарну відповідність. Електрична модель забезпечує достатньо прості функціональні співвідношення для різних типів вхідних сигналів та змін параметрів системи, що дозволяє аналізувати функції різних частин середнього вуха в кількісному відношенні.

ЛЕКЦІЯ 14. МОДЕЛІ МЕХАНІЧНИХ ТА ГІДРОАКУСТИЧНИХ СТРУКТУР ВУХА ЛЮДИНИ-2

Математична модель середнього вуха, запропонована Найдю С.А.

В даному випадку для аналізу коливань барабанної перетинки вуха використовують метод електромеханічних аналогій. В основі цього методу лежить подібність рівнянь, які описують електричні та механічні явища. Електричним величинам – напрузі, ємності, індуктивності, активному опору, відповідають механічні – сила, гнучкість, маса, активний механічний опір.

З фізичної точки зору барабанна перетика являє собою тонку, рівномірно розтягнуту плівку, що має розподілені інерцію та пружність, – мембрану. Інерція мембрани характеризується масою одиниці площі ρ , а пружність – силою натягу τ . Остання визначається як сила, що діє в площині мембрани на одиницю довжини опору мембрани. Мембрана при розрахунках замінюється простою коливальною системою у вигляді підвішеного на пружині поршня.

Еквівалентна маса поршня $m_{екв}$ і маса мембрани m_M пов'язані співвідношенням:

$$m_{екв} = \frac{4}{3}m_M = \frac{4}{3}\pi a^2\rho, [\text{кг}],$$

де a – радіус мембрани.

Еквівалентна гнучкість пружини:

$$C_{екв.} = \frac{1}{8\pi\tau}.$$

Розглянемо електромеханічну схему середнього вуха. Середнє вухо є складною механоакустичною системою. Механічна її частина утворена барабанною перетинкою і з'єднаною з нею системою кісточок. Натяг барабанної перетинки регулюється відповідними м'язами. Акустична частина утворена барабанною порожниною з об'ємом $V_{а.б.пор}$ і з'єднаною з нею євстахієвою трубою. Оскільки євстахієва труба з'єднана з носоглотковим

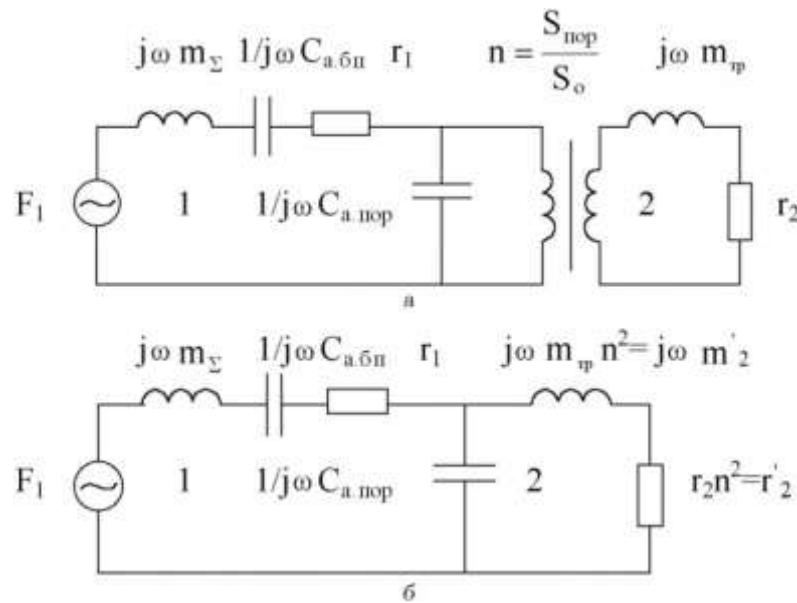


Рис. 14.2. Повна (а) і зведена (б) схеми електричного аналога середнього вуха людини

Слід зазначити, що користуватись методом електромеханічних аналогій і представляти схеми в такому вигляді можна лише в тому випадку, коли розміри елементів акустичної системи є малими, у порівнянні з довжиною звукової хвилі.

Наприклад, на частоті 1000 Гц довжина звукової хвилі складає 0,34 м, а відношення $n = \frac{S_{\text{б.п}}}{S_0} \approx 2,3 > 2$ – коефіцієнт трансформації.

Як видно з рис. 14.2, зведена еквівалентна схема являє собою два зв'язаних контури. Спільним елементом для них (елементом зв'язку) є барабанна порожнина. При цьому маса кісточок, гнучкість барабанної перетинки та барабанної порожнини, а також активна складова акустичного опору створюють послідовний резонансний контур, а гнучкість барабанної порожнини та еквівалентна маса повітря в слуховій трубі – паралельний контур. Особливістю зв'язаної системи є те, що поглинання енергії звуку відбувається у тому ж контурі, в який вона вводиться (у контурі барабанної перетинки). Функція другого контуру в цьому випадку зводиться до розширення смуги пропускання вуха.

Порівнявши реактивні компоненти контура 2 для частоти $f_1 = 1000 \text{ Гц}$, отримаємо:

$$\omega_1 \cdot m_{mp} \cdot n^2 = 1,38 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}; \quad \frac{1}{\omega_1 \cdot C_{a.б.нор}} = 9,09 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}, \quad \text{де}$$

$$C_{a.б.нор} = \frac{V_{a.б.нор}}{\rho c_0^2 S_{б.нор}^2} = 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ м/Н} \quad (c_0 - \text{швидкість звуку в повітрі}).$$

Т. ч., $\omega_1 \cdot m_{mp} \cdot n^2 \ll \frac{1}{\omega_1 \cdot C_{a.б.нор}}$. Це означає, що $C_{a.б.нор}$ закорочена елементами

m_2' та r_2' і не впливає на резонансну частоту вуха.

Парціальна частота контуру 1 становить:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi \sqrt{m_\Sigma C_\Sigma}}$$

$$C_\Sigma = \frac{C_{екв} C_{a.б.нор}}{C_{екв} + C_{a.б.нор}}.$$

Парціальна частота контуру 2 становить:

$$f_2 = \frac{1}{2\pi \sqrt{m_2' C_{a.б.нор}}}$$

В теорії електричних зв'язаних кіл безрозмірним параметром, який характеризує систему, є фактор зв'язку:

$$A = k_{зв} Q, \quad (14.1)$$

де $k_{зв}$ – коефіцієнт зв'язку; Q – добротність системи.

Значення $A=1$ є оптимальним для одержання максимальної ширини смуги. З теорії електричних кіл, зв'язаних через ємність, у випадку $C_2 \rightarrow \infty$ після заміни ємностей (гнучкостей) на еквівалентні об'єми одержимо:

$$k_{зв} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{V_{нор}}{V_{б.н}}\right)}}, \quad (14.2)$$

де $V_{\bar{o}.nop}$ – фізичний об'єм барабанної порожнини; $V_{\bar{o}.n}$ – еквівалентний об'єм барабанної перетинки.

Ці величини зв'язані з відповідними акустичними гнучкостями співвідношеннями:

$$V_{\bar{o}.nop} = \rho_0 c_0^2 C_{a.\bar{o}.nop} S_{\bar{o}.nop}^2; \quad (14.3)$$

$$V_{\bar{o}.n} = \rho_0 c_0^2 C_{a.\bar{o}.n} S_{\bar{o}.n}^2. \quad (14.4)$$

Добротність механічної частини коливальної системи (контур 1) становить:

$$Q_{\bar{o}.n} = \frac{\omega_p m_{a.k}}{r_1} = \frac{1}{\omega_p C_{a.\bar{o}.n} r_1}, \quad (14.5)$$

де ω_p – її резонансна частота; $m_{a.k}$ – акустична маса слухових кісточок.

Через велику різницю парціальних частот:

$$\omega_p = 1 / \sqrt{m_{a.k} C_{a.\bar{o}.n}}, \quad (14.6)$$

добротність акустичної частини системи (контур 2) $Q_{\bar{o}.nop} \gg Q_{\bar{o}.n}$, тому:

$$Q = Q_{\bar{o}.n} \quad (14.7)$$

Модуль акустичного імпедансу механічної частини зв'язаний з еквівалентним об'ємом співвідношенням:

$$Z_a = \sqrt{r_1^2 + (\omega \cdot m_{a.k} - 1 / (\omega \cdot C_{a.\bar{o}.n}))^2} = \rho c_0^2 / (\omega V_{\text{екв.}}), \quad (14.8)$$

де $r_1 = Z_a(\omega_p) = \rho c_0^2 / (\omega_p V_{\text{екв.}}(\omega_p))$.

Після підстановки виразів (14.2-14.7) в (14.1) одержуємо:

$$A = \frac{V_{\text{екв.}}(\omega_p)}{V_{\bar{o}.n}} \cdot \frac{1}{(1 + V_{\bar{o}.nop} / V_{\bar{o}.n})^{1/2}}.$$

ЛЕКЦІЯ 15. МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ СЛУХУ ЛЮДИНИ-1

Акустична імпедансометрія

Акустична імпедансометрія (АІ) – об'єктивний метод діагностики слуху, що полягає в автоматизованому вимірюванні зміни акустичної провідності (адмітанса) середнього вуха при зміні тиску повітря в закритому слуховому проході або при впливі звукового стимулу.

Адмітанс – це акустична провідність структур зовнішнього слухового проходу і середнього вуха, а їх акустичний опір – це акустичний імпеданс. Адмітанс середнього вуха залежить від перепаду тиску повітря між середнім вухом і зовнішнім слуховим проходом..

АІ використовується для отримання інформації про функціональний стан середнього вуха, слухової труби, завитки, слухових і лицьових нервів.

У поєднанні з іншими діагностичними методами, АІ дозволяє діагностувати у дітей і дорослих: наявність рідини в середньому вусі; ушкодження (перфорацію) барабанної перетинки; тимпаносклероз; гіперрухливість барабанної перетинки; порушення прохідності слухової труби; секреторний середній отит; отосклероз; розриви ланцюга слухових кісточок; різноманітні патологічні стани слухового нерва; патологічні стани лицьового нерва тощо.

На практиці найчастіше використовуються два різновиди АІ:

- а) тимпанометрія;
- б) акустична рефлексометрія.

Для проведення АІ використовують спеціальний електроакустичний прилад – імпедансометр (аналізатор середнього вуха). Імпедансометр складається з акустичного зонда з вушною вкладкою, додаткового аудіометричного телефону і цифрового аналізатора звуку з вбудованими в нього регулятором тиску повітря, пультом управління, екраном і принтером (рис. 1).



Рис. 15.1 Аналізатор середнього вуха Interacoustics AA222 (фото компанії Інтеракустикс)

В зонді розташовані мініатюрні телефони і мікрофон, також через зонд проходить тонка еластична трубочка від регулятора тиску. Один мініатюрний телефон надсилає звук (зондуючий тон) в закритий вушною вкладкою зовнішній слуховий прохід. Частота зондуючого тону повинна бути 1000 Гц для дітей у віці до 12 місяців і 226 Гц для пацієнтів всіх інших вікових груп. Мініатюрний мікрофон приймає зондуючий тон, а також відбитий від барабанної перетинки сигнал. При акустичній рефлексометрії другий мініатюрний телефон подає стимулюючий звук в досліджуване вухо (іпсилатеральний стимул), а аудіометричний головний телефон – в протилежне вухо (контралатеральний стимул) (рис.15.2).

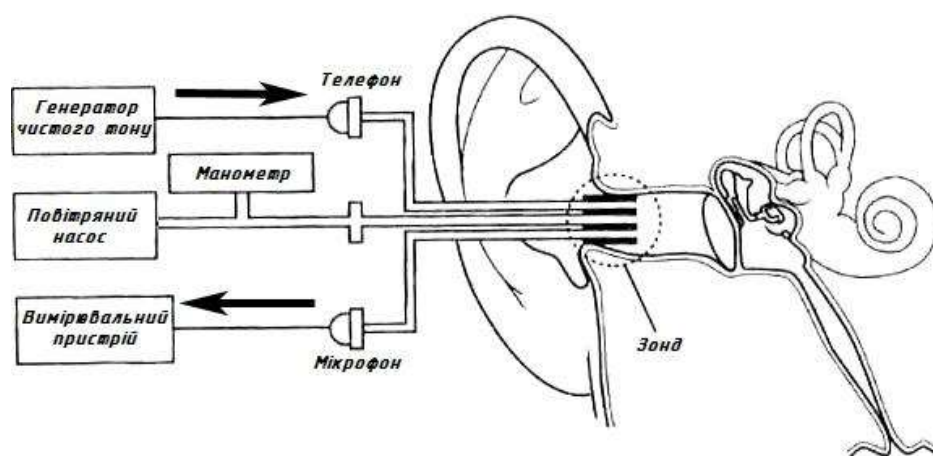


Рис. 15.2. Принцип роботи акустичного імпедансометра

При тимпанометрії регулятор тиску повітря змінює тиск в зовнішньому слуховому проході, герметично закритому вушною вкладкою, відносно навколишнього атмосферного тиску. Спочатку знижує тиск, потім підвищує, а потім вертає його до значення навколишнього атмосферного тиску. Цифровий аналізатор обчислює акустичний адмітанс і його зміни при зміні тиску повітря (при тимпанометрії) або при звукової стимуляції (при акустичній рефлексометрії). Параметри дослідження задаються пультом управління. Результати показуються на екрані і роздруковуються на принтері.

АІ абсолютно безболісна для пацієнта. Вона є одним з найбільш широко застосовуваних діагностичних методів у дітей і дорослих і обов'язкова у всіх розвинених країнах.

Тимпанометрія

Основним методом дослідження функції євстахієвої труби серед об'єктивних методів діагностики слуху є багаточастотна тимпанометрія.

Вона проводиться з метою виявлення деяких видів порушень слуху, що носять функціональний характер, а також дозволяє встановити тиск в середньому вусі, ступінь рухливості барабанної перетинки, оцінити стан євстахієвої труби, цілісність і ступінь рухливості слухових кісточок.

Тимпанометрією називається реєстрація зміни акустичного адмітанса при зміні тиску в зовнішньому слуховому проході.

Процедура проведення тимпанометрії полягає у введенні зонда в зовнішній слуховий прохід і створенні герметичного ущільнення за допомогою вушної вкладки. Зонд містить мініатюрний телефон, мікрофон і повітряний насос. Повітряний насос змінює тиск в зовнішньому слуховому проході. Телефон вводить калібрований тональний сигнал, який змінюється по частоті (226, 660, 880 і 1000 Гц) і гучності в зовнішній слуховий прохід. У нормі, велика частина звуку, яку відтворює динамік, буде проходити через середнє вухо, в той час як менша частина звуку буде відбиватися від барабанної

перетинки. Мікрофон реєструє рівень звукового тиску, відбитий барабанною перетинкою і стінками слухового проходу. Отримані дані про сумарне значення фізичного об'єму зовнішнього слухового проходу і еквівалентний об'єм середнього вуха відображаються графічно на тимпанограмах (рис.15.3).

Тимпанограма – графічне зображення змін адмітанса в залежності від тиску в зовнішньому слуховому проході.

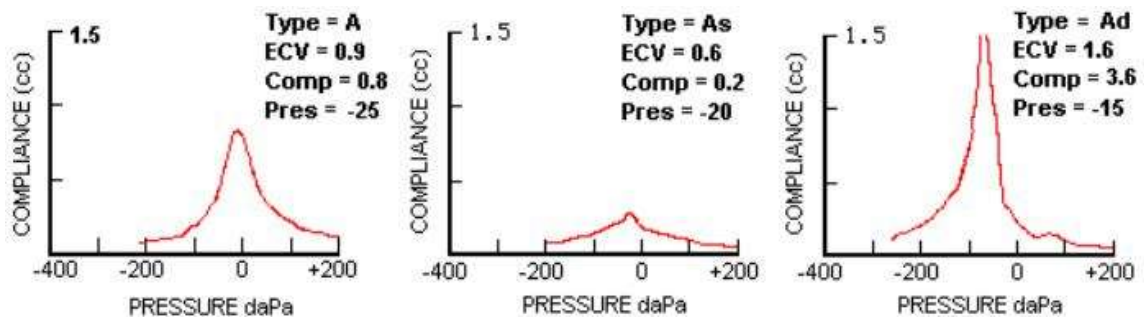


Рис. 15,3. Тимпанограми типу А

Найбільший адмітанс (піддатливість) в нормальному вусі досягається при однаковому тиску по обидва боки барабанної перетинки (нульовому перепаді тиску). Це демонструє «пік» тимпанограми, що знаходиться на нульовому тиску (що дорівнює атмосферному). При підвищенні і зниженні тиску в ЗСП адмітанс знижується приблизно рівномірно. Нормальна тимпанограма має форму літери «Λ» характерної амплітуди (висоти) і ширини. Форма і амплітуда тимпанограми (що характеризує тип тимпанограми) змінюється при зміні жорсткості системи (наприклад, за рахунок розриву кола слухових кісточок, середнього отиту тощо).

Класифікацію тимпанограм розробив видатний американський вчений і клініцист Джеймс Джергер. Класичні категорії тимпанограм, які є загальноприйнятими:

а) тип А – свідчить про нормальний тиск в середньому вусі, нормальну рухливість барабанної перетинки і провідність слухових кісточок.

б) тип В (рис. 15.4) не має піків тиску повітря. Тимпанограма типу В спостерігається при досить товстій барабанній перетинці; перфорації барабанної перетинки або синдромі зяяння євстахієвої труби; закупорці слухового проходу сірчаною пробкою або стороннім тілом.

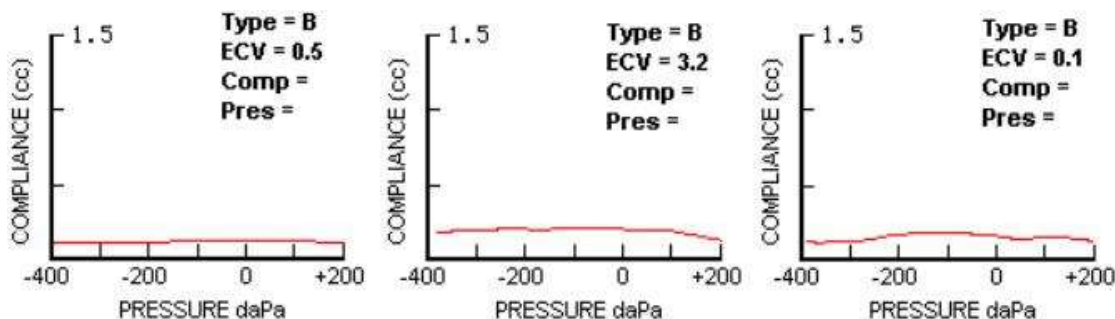


Рис. 15.4. Тимпанограми типу В

в) тип С (рис. 15.5) свідчить про негативний тиск в середньому вусі з дисфункцією євстахієвої труби.

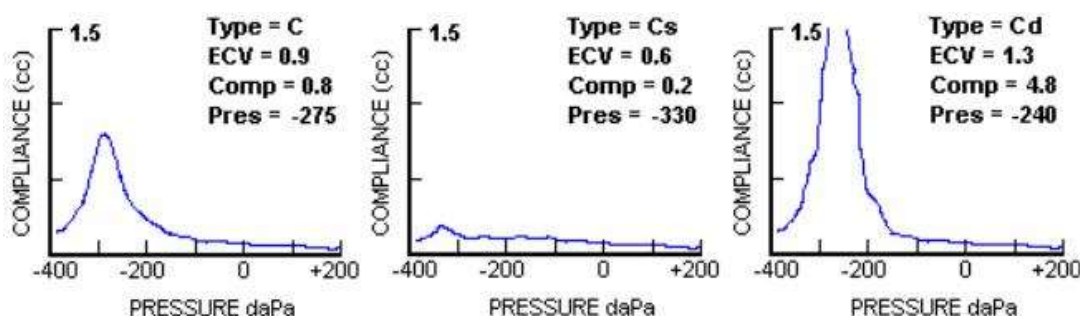


Рис. 15.5. Тимпанограми типу С

Порушення функції євстахієвої труби – повне або часткове її закриття – виникає при аденоїдах, ущелині піднебіння, пухлини носоглотки, набряку слизової носоглотки в результаті інфекції. У дітей грудного та молодшого віку можуть бути функціональні порушення – спадання стінок євстахієвої труби внаслідок зниження еластичності, неповного розкриття глоткового отвору євстахієвої труби внаслідок дисфункції м'язу, що натягує м'яке піднебіння.

ЛЕКЦІЯ 16. МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ СЛУХУ ЛЮДИНИ-2

Акустична рефлексометрія

Акустичний рефлекс внутрішньовушних м'язів – це рефлекторне скорочення під впливом звуку стремінцевого м'язу середнього вуха, а при дуже сильному звуці – м'язу, що натягує барабанну перетинку. Акустичний рефлекс являю собою двосторонній рефлекс, тобто виникає в обох вухах, навіть якщо звук надходить тільки в одне вухо. Цей рефлекс – безумовний, тобто виникає мимовільно, не залежно від волі слухача. При гучному звуці (близько 70 дБ) спрацьовує акустичний рефлекс стремінцевого м'язу. Він скорочується і змінює рух стремінця таким чином, щоб захистити внутрішнє вухо від надмірного навантаження.

Акустичний рефлекс змінює адмітанс середнього вуха. Ця зміна реєструється за допомогою імпедансометра. Дуже важливо мати на увазі, що напрям зміни адмітанса в разі акустичного рефлексу стремінцевого м'язу і м'язу, що натягує барабанну перетинку, протилежні. Цей факт часто не береться до уваги, що призводить до діагностичних помилок.

Фізіологічне призначення акустичного рефлексу, головним чином, полягає в оберіганні органу слуху від інтенсивних звукових перевантажень, які можуть привести до акустичної травми.

Акустична рефлексометрія – реєстрація акустичного рефлексу. Мінімальний рівень звуку, необхідний для викликання скорочення стремінцевої м'язи називається порогом акустичного рефлексу. У нормі поріг акустичного рефлексу знаходиться на рівні 65-90 дБ. Акустичний рефлекс в нормі виявляється по обидва боки (бінаурально), навіть при ізолюваній стимуляції одного вуха.

Акустична рефлексометрія важлива для діагностики кондуктивної (порушення слуху, при якому ускладнене проведення звукових хвиль по шляху зовнішнє вухо – барабанна перетинка – слухові кісточки середнього вуха –

внутрішнє вухо) і сенсоневральної приглухуватості (втрата слуху, викликана поразкою звукосприймального апарату: структур внутрішнього вуха, присінково-завиткового нерва, або центральних відділів слухового аналізатора).

За допомогою зонду, введеного в зовнішній слуховий прохід, створюється порожнина обмеженого об'єму, в яку подається звуковий сигнал. Відбита звукова енергія реєструється мініатюрним мікрофоном, введеним в зовнішній слуховий прохід. Величина відбитої звукової енергії порівнюється з вихідною величиною.

Акустична рефлексометрія використовується, перш за все, при дослідженні порогів чутності у дітей і у випадках, коли визначення аудіометричних порогів неможливо. Звуковими стимулами при даному виді дослідження служать тони частотою 500, 1000, 2000, 4000 Гц і широкопasmовий шум. Імпедансометр автоматично підвищує силу (рівень) стимулу і знаходить поріг акустичного рефлексу і визначає зростання амплітуди акустичного рефлексу по мірі підсилення стимулу.

Отоакустична емісія

Отоакустична емісія використовується для оцінки кохлеарної цілісності і вимірювань реакції зовнішніх волоскових клітин на дію акустичних стимулів. Отоакустична емісія використовується в якості швидкого об'єктивного скринінгу кохлеарної функції.

Отоакустична емісія являє собою надзвичайно слабкі звукові коливання, генеровані завиткою, які можуть бути зареєстровані в зовнішньому слуховому проході за допомогою високочутливого мікрофона. Ці коливання виникають в результаті активних механічних процесів, що протікають в зовнішніх волоскових клітинах кортієвого органу. Активні рухи волоскових клітин, що підсилюються за рахунок позитивного зворотного зв'язку, передаються базилярній мембрані, і обумовлюють виникнення біжучих хвиль, спрямованих в зворотньому напрямку. Останні досягають підніжної пластинки стремінця і

призводять до відповідного коливального процесу в системі слухових кісточок, барабанній перетинці і стовпі повітря в зовнішньому слуховому проході.

Вчені виявили кілька видів отоакустичної емісії, але клінічне застосування знайшли два з них:

1. Отоакустична емісія на частоті продуктів спотворення;
2. Затримана викликана отоакустична емісія.

Коливання базилярної мембрани на додаткових частотах, які були відсутні в звуковому стимулі, називаються **продуктами спотворення**. А викликана ними отоакустична емісія називається **отоакустичною емісією на частоті продуктів спотворення**.

У осіб з нормальним слухом пороги виникнення обох видів отоакустичної емісії дуже близькі до суб'єктивних порогів чутності. Відмінною особливістю даного діагностичного методу є те, що при наявності порушення слуху, що супроводжується підвищенням порогів чутності до 30 дБ і більше, емісія перестає реєструватися.

Обидва види отоакустичної емісії доповнюють один одного, але мають деякі відмінності і різне клінічне застосування.

Затримана викликана отоакустична емісія як правило застосовується для скринінгу новонароджених, діагностики слуху в обмеженому діапазоні частот до 5000 Гц і для виявлення «мертвих зон» завитки.

Отоакустична емісія на частоті продуктів спотворення застосовується для діагностики в розширеному діапазоні частот до 8000 Гц, а також для моніторингу і раннього виявлення порушення функції зовнішніх волоскових клітин з метою профілактики незворотнього зниження слуху.

Прилад для реєстрації отоакустичної емісії (аналізатор отоакустичної емісії) працює наступним чином. Акустичний процесор генерує первинні тони при реєстрації отоакустичної емісії на частоті продуктів спотворення або серії широкосмугових клацань при реєстрації затриманої викликанної отоакустичної емісії. Ці тони або клацання надходять на мініатюрні телефони, розташовані в електроакустичному зонді приладу. Мікротелефони створюють відповідні

звукові стимули. На зонд одягнений вушний вкладиш, що вставляється в зовнішній слуховий прохід і герметично закриває його. З зонда звукові стимули надходять в зовнішній слуховий прохід. В зонді також розташований високочутливий мініатюрний мікрофон. Він приймає звук в зовнішньому слуховому проході, перетворює його в електричний сигнал і передає цей сигнал в аналого-цифровий перетворювач. Аналого-цифровий перетворювач перетворює аналоговий електричний сигнал в цифрову форму і передає цифровий сигнал в цифровий процесор. Цифровий процесор аналізує сигнали, виділяє ото акустичну емісію з шуму і стимулів, і показує результати на екрані приладу. Результати вносяться в пам'ять приладу і роздруковуються на принтері.

Отоакустична емісія на частоті продуктів спотворення

Найбільше значення для отримання інформації про слухову чутливість має реєстрація отоакустичної емісії на частоті продуктів спотворення, яка виявляється при спектральному аналізі активності, зареєстрованої у відповідь на одночасну стимуляцію двома первинними тональними сигналами з частотами f_1 і f_2 .

Найбільша отоакустична емісія на частоті продуктів спотворення досягається при співвідношенні частот первинних тонів $f_2 = 1,22 f_1$, а також при рівнях первинних тонів, що відрізняються на 10 дБ. Отоакустична емісія на частоті продуктів спотворення найкраще реєструється на частоті $2f_1 - f_2$. Цікаво, що місцем походження отоакустичної емісії є не та ділянка базилярної мембрани, яка налаштована на сприйняття частоти $2f_1 - f_2$, а та ділянка, яка налаштована на частоту f_2 . Тому ця частота вважається "тестовою" і саме її показують в результатах тесту, хоча в дійсності стимулом є пара первинних тонів. Результати реєстрації отоакустичної емісії на частоті продуктів спотворення записуються у вигляді графіка, що показує рівні емісії в залежності від "тестової" частоти f_2 . Також на графіку показують рівень шуму

на частоті f_2 . Це потрібно для того, щоб упевнитися, що ото акустична емісія дійсно присутня – її рівень повинен перевищувати рівень шуму на 3-6 дБ.

Реєстрація отоакустичної емісії на частоті продуктів спотворення можлива в розширеному діапазоні частот – до 8000 Гц. Це має особливе значення, оскільки, по-перше, дозволяє об'єктивно виявити високочастотне порушення слуху і, по-друге, виявити пригнічення функції зовнішніх волоскових клітин ще до того, як знизиться слух. Саме ця властивість даного виду ото акустичної емісії дозволяє запобігти незворотнє зниження слуху у людей, що піддаються впливу шкідливих для слуху факторів – виробничого і сільськогосподарського шуму, шуму гелікоптерів та іншої військової техніки, шуму на рок-концертах, антибіотиків, протиракового лікування, інфекційних захворювань тощо.

Затримана викликана отоакустична емісія

Затриману викликану отоакустичну емісію реєструють у відповідь на серію з 2000-3000 широкосмтових звукових клацань тривалістю 80-100 мкс з рівнем звукового тиску як правило 80 дБ і частотою 20-50 Гц. Щоб послабити сильні звуки стимулюючих клацань, що потрапляють в аналізатор, їх серію складають з послідовності з чотирьох клацань протилежної полярності і різної амплітуди. При цьому цифровий аналізатор звуку накопичує і усереднює відповіді на ці 2-3 тисячі клацань. Результати показуються у вигляді форми звукової хвилі протягом 20-30 мс після початку стимулу, а також у вигляді спектра. Спектральне подання затриманої викликаної отоакустичної емісії має велику діагностичну цінність – воно з великою точністю показує частоти, на яких не працюють зовнішні волоскові клітини.

Даний вид емісії може бути успішно зареєстрований у дітей на третій-четвертий день після народження. Висока чутливість отоакустичної реакції навіть при найменших порушеннях функціонального стану органу слуху дозволяє вважати досить значними можливості використання її реєстрації в

якості методу проведення масових обстежень слуху у дітей перших років життя.

Недоліком цього діагностичного методу є обмеженість верхньої межі діапазону частотами 4,5-5 кГц. Це пов'язано з тим, що ото акустична емісія генерується зовнішніми волосовими клітинами, розташованими в базальній частини завитки – близько від овального вікна завитки, в якому розташоване стремінце. Тому високочастотні складові затриманої викликанної отоакустичної емісії з'являються дуже швидко після початку стимулу клацань і повністю їм маскуються, що не дозволяє виявити їх аналізатором.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Алдошина И. А. Основы психоакустики. – М.: Оборонгиз, 2000 – 154 с.
2. Алдошина И.А., Приттс Р. Музыкальная акустика. Учебник. — СПб.: Композитор, 2006. – 720 с.
3. Вологдин Э.И. Слух и восприятие звука: Курс лекций. – СПб.: СТ "Факультет ДВО", 2004. – 36 с.
4. Лабутин В. К., Молчанов А. П. Модели механизмов слуха. – М.: Энергия, 1973. – 200 с.
5. Альтман Я.А. Слуховая система. – Л.: Наука, 1990. – 620 с.
6. Найда С. А. Электрические модели среднего и внутреннего уха человека. Электроника и связь. – 2012. – № 3(68). – С. 40–48.
7. Носова А.В., Мусалимов В.М. Математическое моделирование динамических процессов в человеческом органе слуха. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2007. – № 37, С. 311-317.
8. <http://ergoya.com.ua/category/slux-uk/diagnostika-ta-sluxoprotezuvannya/>